

Stefan Hofmanninger

BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER  
ABGASNACHBEHANDLUNGSSYSTEME FÜR EINEN MODERNEN  
PKW-DIESELMOTOR

Diplomarbeit



Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau F 747

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Technische Universität Graz

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Grabner  
Dipl.-Ing. Andreas Wagner

**Institutsvorstand:**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder

Graz, 2012



Diplomarbeit

**Bewertung unterschiedlicher Abgasnachbehandlungssysteme für einen  
modernen PKW-Dieselmotor**

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik  
Technische Universität Graz

**Kontakt Daten Betreuer:**

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Grabner:

+43 (316) 873 - 7223  
grabner@ivt.tugraz.at

Dipl.-Ing. Andreas Wagner

+43 (316) 873 - 7213  
andreas.wagner@ivt.tugraz.at

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger

+43 (316) 873 - 7714  
hausberger@ivt.tugraz.at

**Kontakt Daten Autor:**

Stefan Hofmanninger

stefan.hofmanninger@gmx.at



# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

Stefan Hofmanninger



# Vorwort

Da sich das Interesse an der Automobil- und Motorentchnik bei mir erst am Ende meines Studiums durchgesetzt hat, bin ich mir nach dieser Diplomarbeit sicher, dass ich die richtige Entscheidung in Bezug auf meine Diplomarbeit und auch für meine zukünftige Laufbahn getroffen habe.

Die individuelle Mobilität definiert sich zum Großteil durch das Automobil. Da die zurückgelegten Kilometer pro Erdbewohner nicht sinken werden, ist eine Weiterentwicklung der Automobiltechnologie unablässig. Aufgrund der Bestimmungen hinsichtlich Schadstoffemissionen wurden komplexe Motoren entwickelt, die es gilt, weiter zu verbessern und zu optimieren.

Mein Dank bezüglich dieser Diplomarbeit gilt:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder, der mir ermöglicht hat, die Diplomarbeit am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik durchzuführen.

Dipl.-Ing. Andreas Wagner, der mich nicht nur bei allen Aufgaben und Tätigkeiten hervorragend unterstützt hat, sondern auch die Arbeit durch die angeregten Diskussionen besonders interessant und lehrreich gestaltet hat.

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Grabner, für die Betreuung und die Ratschläge während der Diplomarbeit.

Dipl.-Ing. Monschein Wolfgang für die Hilfe am Prüfstand und Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger für die Diskussionen und die Unterstützung bei der gesamten Arbeit. Stellvertretend für das Werkstättenteam möchte ich mich bei Markus Schmidl für die unkomplizierte tatkräftige Unterstützung bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Bürokollegen für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und meiner Lebensgefährtin, ohne deren Unterstützung ein solches Studium nicht zu bewältigen gewesen wäre.

Graz, Februar 2012

Stefan Hofmanninger





# Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war es, eine Möglichkeit zur Reduzierung von Kosten und Zeit in der Entwicklung von Abgasnachbehandlungssystemen zu untersuchen. Zu diesem Zweck sollten die dafür nötigen Rollenmessungen reduziert und durch Messungen am stationären Motorprüfstand ersetzt werden. Des Weiteren sollten verschiedene Effekte der Abgasnachbehandlungssysteme anhand von Messdaten untersucht werden.

In dieser Diplomarbeit wurden zehn verschiedene Dieselaugsnachbehandlungssysteme auf ihr Schadstoffreduzierungsverhalten untersucht. Hierbei handelte es sich jeweils um eine Kombination aus einem Oxidationskatalysator und einem nachgeschalteten Dieselpartikelfilter. Die Arbeit gliedert sich in experimentelle als auch simulatorische Untersuchungen.

Der experimentelle Teil der Arbeit bezieht sich auf Untersuchungen am Motorprüfstand. Diesen Messungen wurde ein Kurztest zugrunde gelegt, dessen Ergebnisse genauer betrachtet wurden.

Die Versuche wurden mit einem 6-Zylinder Turbodiesel-Motor mit Hoch- und Niederdruckabgasrückführung und zweistufiger Aufladung an einem stationären Motorprüfstand durchgeführt.

In einem vorangegangenen Projekt wurde ein Kurztest ermittelt, mit dessen Prüfstandsmessergebnissen auf die zu erwartenden Fahrzeugemissionen im FTP-75-Fahrzyklus rückgeschlossen werden sollten.

Das Konvertierungsverhalten und die Änderungen weiterer Katalysatoreigenschaften sollten in Bezug auf Langzeitstabilität untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden gealterte und neuwertige Abgasnachbehandlungssysteme untersucht. In weiteren Auswertungen wurde das Verhalten in verschiedenen Rußbelastungszuständen, des jeweils nachgeschalteten Dieselpartikelfilters, bewertet.

In einem weiteren Teil der Arbeit wurden diese Erkenntnisse mit einer Fahrzyklussimulation weiter untersucht und überprüft.

Angemerkt werden muss, dass die Erstellung des Kurztestes und die Systematik der Simulationsrechnung nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit waren.



# Abstract

In this diploma thesis a comparison of ten different diesel exhaust treatment systems for the potential to reduce pollutants has been done. Each System is a combination of a diesel oxidation catalyst and a particle filter which is installed downstream. This work consists of an experimental and a simulation part.

The experimental part of this work is the measurement of the ten exhaust treatment systems on the engine test bench. An investigation of the temporal characteristics of these measurement results and an interpolation of these tests had been done. The engine tests were done on a six cylinder turbocharged diesel engine with use of cooled high- and low-pressure exhaust gas recirculation and two stage turbo charging.

With a short-test from previous projects and the measurement results from the test bench the expected emissions in the FTP 75 driving cycle had to be simulated.

The conversion level and the mutation of the catalyst characteristics concerning to the long-term stability were verified. For this purpose degreend and artificially aged catalysts were evaluated. In further evaluations the properties with several soot loading conditions were valued.

These results were verified with a simulation of the short test and the FTP 75 driving cycle.

It should be noted that the creation of the short test and the interpolation tool were not part of this diploma thesis.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Die Zukunft des Dieselmotors . . . . .	3
1.2.1	Aussicht für den Dieselmotor . . . . .	5
1.3	Diesel als Kraftstoff . . . . .	7
1.4	Die Umweltauswirkungen des Verkehrs . . . . .	8
1.5	Abgase . . . . .	10
1.6	Abgasvorschriften . . . . .	17
1.6.1	Abgasgesetzgebung USA . . . . .	17
1.6.2	Abgasgesetzgebung Europa . . . . .	20
1.7	Dieselausgasnachbehandlungssysteme . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung und Motivation</b>	<b>24</b>
2.1	Übersicht der durchgeführten Untersuchungen . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Prüfstandsuntersuchungen</b>	<b>28</b>
3.1	Versuchsmotor . . . . .	28
3.1.1	Aufladung . . . . .	28
3.1.2	Abgasrückführung . . . . .	30
3.2	Prüfstands Aufbau . . . . .	32
3.3	Katalysatoren . . . . .	33
3.3.1	Einteilung der Katalysatoren . . . . .	33
3.3.2	Aufbau . . . . .	33
3.4	Emissionsmessgeräte . . . . .	37
3.5	Emissionsberechnung . . . . .	37
3.6	Kurztest . . . . .	39
3.7	Messverfahren . . . . .	41
3.8	Kurztest Anpassung . . . . .	45
3.9	Beladungsmessung . . . . .	47
3.10	Kennfeld . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Auswertung des Kurztestes</b>	<b>50</b>
4.1	NO <sub>x</sub> -Einspeicherung . . . . .	50
4.1.1	Einspeicherungsverhalten . . . . .	50

4.1.2	Einspeicherungseffekt . . . . .	52
4.1.3	Auswirkung der Alterung auf die Einspeicherung . . . . .	55
4.1.4	Gesamtübersicht NO <sub>x</sub> -Einspeicherungsverhalten . . . . .	57
4.2	HC-Konvertierung . . . . .	59
4.3	N <sub>2</sub> O-Bildung . . . . .	62
4.4	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis . . . . .	64
4.4.1	Messdaten . . . . .	64
4.4.2	Alterungseinfluss auf das NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis . . . . .	66
4.5	Beladungsuntersuchung . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Interpolation des Kurztestes</b>	<b>72</b>
5.1	Vorgehensweise der Interpolationsrechnung . . . . .	72
5.2	Datenbasis und Analyseverfahren . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Simulation</b>	<b>78</b>
6.1	Einfluss des Abgasgedrucks . . . . .	79
6.2	Vorgehensweise . . . . .	80
6.3	PHEM basierter FTP-75 . . . . .	81
6.4	Ergebnisse der Simulation . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Bewertung und Analyse</b>	<b>86</b>
7.1	Validität der PHEM Rechnung . . . . .	86
7.1.1	Vorgehensweise . . . . .	86
7.1.2	Ergebnis . . . . .	87
7.2	Auswertung der Kennfeldmessung . . . . .	88
7.2.1	Kennfelddaten . . . . .	88
7.2.2	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Stabilisierung . . . . .	89
7.3	Stabilitätsanalyse der Interpolation . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Ergebnisse aus Interpolation und Simulation</b>	<b>95</b>
8.1	NO <sub>x</sub> -Emissionen . . . . .	95
8.2	HC-Emissionen . . . . .	97
8.3	N <sub>2</sub> O-Emissionen . . . . .	98
8.4	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis . . . . .	99
8.5	Beladungseinfluss . . . . .	101
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>102</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>104</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>112</b>
10.1	Projektgliederung . . . . .	112
10.2	Messübersicht . . . . .	114

# Abkürzungen, Formelzeichen und Definitionen

## Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
AMA CEBII	Abgas-Messanlage
ATL	Abgasturbolader
C	Kohlenstoff
CARB	California Air Resources Board
CAN	Controller Area Network
CeO <sub>2</sub>	Ceroxid
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CRT	Continuous Regenerating Trap (kontinuierlich regenerierender Rußfilter)
CSF	Catalytic Soot Filter (Katalytischer Rußfilter)
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DOC	Diesel Oxidationskatalysator
DPF	Diesel Partikelfilter
EPA	Environmental Protection Agency
EU	Europäische Union
FTP 75	Federal Test Procedure
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GUS	Gemeinschaft unabhängiger Staaten
HC	Kohlenwasserstoffe
LEV	Low-Emission Vehicle
LKW	Lastkraftwagen
M	Katalytisches Element
NO <sub>x</sub>	Stickoxide (Summe aus NO und NO <sub>2</sub> )
N	Stickstoff
N <sub>2</sub>	molekularer Stickstoff (Distickstoff)
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>3</sub>	Stickstoffoxidant (Nitrat)

N <sub>2</sub> O	Distickstoffmonoxid
NMOG	nicht-methanhaltige organische Gase
O	Sauerstoff
O <sub>2</sub>	molekularer Sauerstoff (Disauerstoff)
O <sub>3</sub>	Ozon
OH	Hydroxid
OPEC	Organisation Erdöl exportierender Länder
PHEM	Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model
PKW	Personenkraftwagen
PZEV	Partial Zero-Emission Vehicle
SCR	Selektiv katalytische Reduktion
SO <sub>2</sub>	Schwefel
SULEV	Super Ultra-Low-Emission Vehicle
TLEV	Transitional Low-Emission Vehicle
ULEV	Ultra-Low-Emission Vehicle
UPI	Umwelt- und Prognose Institut e.V.
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
USA	United States of America
VKM	Verbrennungskraftmaschine
ZEV	Zero-Emission Vehicle



## Definitonen

Agglomerat	Anhäufung loser Bestandteile zu einem festen Verbund
adsorbieren	anreicherung von Gasen oder Flüssigkeiten an der Oberfläche eines Festkörpers
Carsharing	gemeinschaftliche Nutzung von Fahrzeugen
Canning	gemeindames Katalysatorgehäuse
degreened	neuwertige Katalysatoren
gealtert	künstlich gealtert
Hämoglobin	sauerstofftransportierende Proteine in den roten Blutkörperchen
Lachgas	Disticksoffmonoxid $N_2O$
Sulfate	Salze der Schwefelsäure

## Formelzeichen

$\lambda$	Luftverhältnis	
M	Drehmoment	Nm
n	Drehzahl	$\text{min}^{-1}$
P	Leistung	kW
$G_{Exh}$	berechneter Abgasmassenstrom	kg/h
$AFS_{dm}$	Luftmasse	kg/h
$EM_{ECU}$	Einspritzmenge	mg/Hub
$p_{40}$	Abgasgegendruck nach ATL	mbar
$T_{40}$	Rohabgastemperatur nach ATL	$^{\circ}\text{C}$
$E_{NO_x}$	Stickoxideinspeicherungsrate	
$K_{HC}$	HC-Konvertierungsrate	
$\text{Diff}_{NO_2/NO_x}$	Differenz $NO_2/NO_x$	
$P$	Interpoliertes Ergebnis	
$E_{Kurztest}$	Kurztestpunkt	
$GW_1$	Gewichtungsfaktor 1	
$GW_{11}$	Gewichtungsfaktor 2	
$HC_{nDPF}$	HC-Emissionen nach DPF	



# 1 Einführung

Die Mobilität nimmt in der heutigen Gesellschaft einen hohen Stellenwert ein. Um Wohnen, Arbeiten, Konsum, Bildung und Freizeit vereinbaren zu können ist es teilweise notwendig, weite Wege hinter sich zu bringen. Nicht nur die Menschheit wird weltweit immer mobiler sondern auch der Transport von Waren und Gütern steigt stetig an.

## 1.1 Einleitung

Man ist mobil, also unterwegs. Der Individual- und Güterverkehr nimmt seit Jahrzehnten kontinuierlich zu. Nicht nur in den bereits gut mobilisierten Länder des sogenannten „Westens“, sondern auch in den aufsteigenden Industrienationen wie Indien und China wird das Automobil immer mehr zu einem wichtigen Verkehrsmittel des Individualverkehrs. Besonders in diesen Ländern wird das Auto, noch mehr als bei uns, als Statussymbol und als Zeichen für Reichtum verstanden.

## Motorisierung

Die Motorisierung hat große Möglichkeiten eröffnet. Es ist nun vielen Menschen möglich Entfernungen nach ihren eigenen Bedürfnissen zurückzulegen.

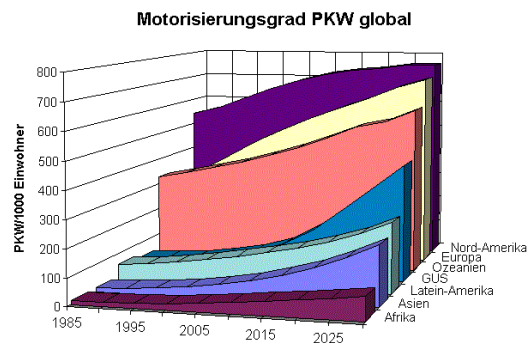
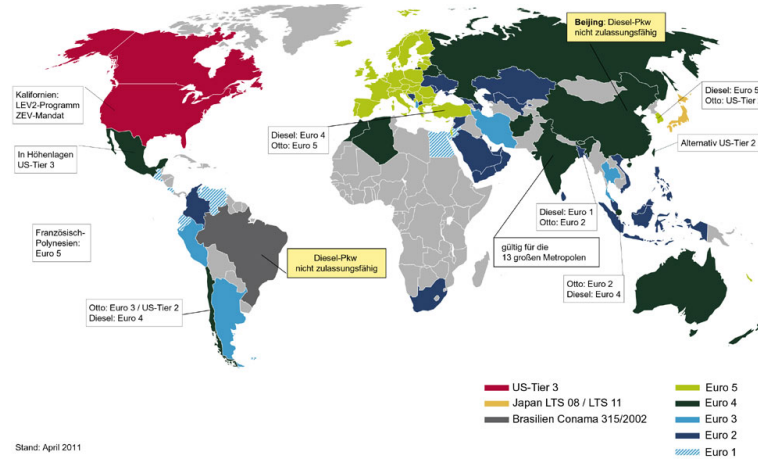


Abbildung 1.1: Motorisierungsgrad der Welt in PKW/1000 Einwohner [28]

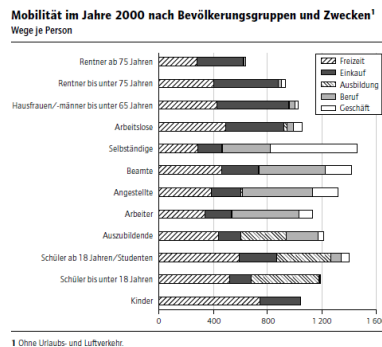
In Abbildung 1.1 ist der Motorisierungsgrad der einzelnen kontinentalen Erdteile zu sehen. Auffallend ist die flacher werdende Kurve des Nord-Amerikanischen Kontinents, aber auch der stark steigende Motorisierungsgrad der GUS-Staaten und Asiens. Hier ist ein starkes Wachstum für besonders billige und einfache Fahrzeuge zu erwarten. Diese

müssen dort im Vergleich zu Europa oder den USA weniger strenge Abgasvorschriften einhalten (Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2:** Abgasvorschriften weltweit April 2011 [4]

In Anbetracht dieser Entwicklungen ist es notwendig und auch sinnvoll, gesellschaftliche und persönliche Einstellungen gegenüber dem Verkehr und den daraus entstehenden Folgen zu überdenken.



**Abbildung 1.3:** Mobilitätsverhalten im Jahr 2000 [6]

In Abbildung 1.3 ist eine hohe Nutzung des PKWs für die Gestaltung der Freizeit über alle Altersschichten hinweg zu erkennen. Das Zusammenleben in einer immer mobileren und dynamischeren Gesellschaft muss in Zukunft durch einen vernünftigen, effizienten und nachhaltigen Einsatz von individueller Mobilität gesichert werden.

Hierbei könnten oder sollen neue Informations- und Kommunikationstechnologien den andauernden Mobilitätshunger eindämmen. Durch die hohe Entwicklung des Verkehrssystems in Europa können neue Möglichkeiten und Wege für die Mobilität der Zukunft gefunden und eine Vorreiterrolle in diesem Bereich eingenommen werden. Erste Versuche die Mobilität neu zu definieren werden in Projekten, wie zum Beispiel Carsharing, bereits unternommen [6].

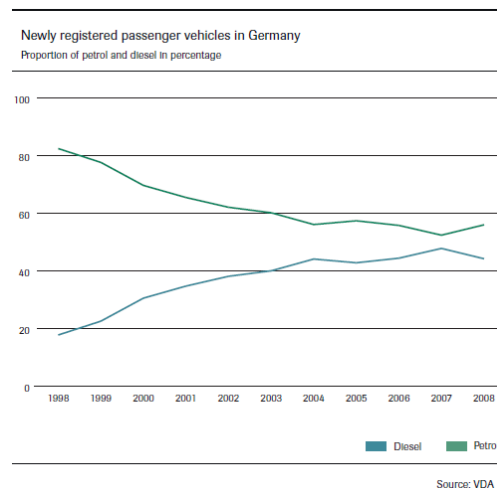
## 1.2 Die Zukunft des Dieselmotors

Die Motorisierung von Personenkraftwagen mit Dieselmotoren hat in den letzten zwei Jahrzehnten einen Siegeszug hinter sich. Mittlerweile sind rund ein Drittel der in Westeuropa eingesetzten Fahrzeuge mit einem Dieselmotor motorisiert [30].

Aufgrund des Verbrauchsvorteils und einem dem konventionellen Benzinsaugmotor überlegenen Drehmoment hat sich der Diesel im Nutzfahrzeugsektor gänzlich durchgesetzt und hat diese Vorteile auch auf den Individualverkehr übertragen.

### Marktsituation des Dieselmotors

In Europa und hier speziell in Westeuropa jedoch scheint sich der Dieselanteil einem Höhepunkt anzunähern. Durch neue Turbobenzinmotoren und Hybridvarianten wird der Benzinmotor wieder konkurrenzfähiger. Es ist aber anzumerken, dass auch hier der Preisvorteil in der Anschaffung, der bisher für den Benzinmotor sprach, relativiert werden muss, da auch bei diesen aufgeladenen Benzinmotoren ein erhöhter Produktionsaufwand gegeben ist.



**Abbildung 1.4:** Diesel- und Benzinfahrzeug Neuzulassungen in Deutschland in % [30]

In Abbildung 1.4 ist der prozentuale Anteil von Diesel- und Benzinfahrzeugen bei den Neuzulassungen in Deutschland seit 1998 dargestellt. Seit 2007 ist eine Stagnation von Dieselfahrzeug-Neuzulassungen zu erkennen. Ein Grund dafür dürfte der höhere Anschaffungspreis eines dieselbetriebenen Fahrzeugs und der immer weiter ansteigende Dieselpreis sein, der die Zeit bis zur Amortisierung eines Dieselfahrzeuges deutlich verlängert.

In Abbildung 1.5 ist deutlich zu erkennen, dass der Klein- und Kompaktwagenmarkt in Deutschland das größte Volumensegment darstellt. Diese werden zum Großteil mit Benzinmotoren ausgestattet.

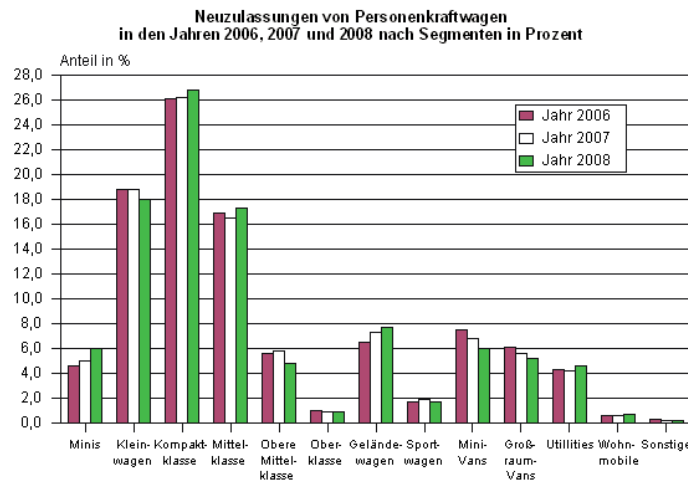


Abbildung 1.5: Neuwagenzulassungen nach Segment in % [14]

## Preissituation des Dieseldraftstoffes

Nicht nur ein Steigen der Amortisationsdauer eines Diesel-PKW, sondern auch der ungebrochene Trend zum Klein- und Kleinwagen, welche zum Großteil mit günstigen und leistungsschwächeren Benzinmotoren motorisiert werden, können ein weiterer Aspekt für die Stagnation der Neuzulassungen sein.



Abbildung 1.6: Treibstoffpreise in Österreich mit Verbraucherpreisindex [2]

Da besonders in diesem Segment ein hoher Kostendruck auf den Herstellern lastet und Kleinwagen aufgrund der meist geringeren Laufleistung aus wirtschaftlicher Sicht nicht für die Motorisierung mit einem Dieselmotor infrage kommen, werden diese Fahrzeuge mit einem in der Produktion meist günstigeren Benzinsaugmotor ausgerüstet.

Höhere Rohstoffkosten für Stahl, Kupfer und Aluminium unterstützen zudem den

Trend zu kleineren und kostengünstigeren Fahrzeugen.

Ein Hauptgrund für die wieder erstarkte Nachfrage nach Kleinwagen und somit nach PKWs mit Benzinmotor dürfte der Preisanstieg des Kraftstoffs sein. In Abbildung 1.6 ist bis 2002 ein unter dem Verbraucherpreisindex ansteigender Treibstoffpreis zu sehen. Seit 2004 ist bei Otto- und Dieseltreibstoff ein überdurchschnittlicher Preisanstieg feststellbar. Auffallend ist hier der dem Benzinpreis immer weiter annähernde Dieselpreis. Die Steigerungen des Preises für Diesel kann auch durch die in vielen Ländern steuerliche Begünstigung des Diesels nicht mehr ausgeglichen werden.

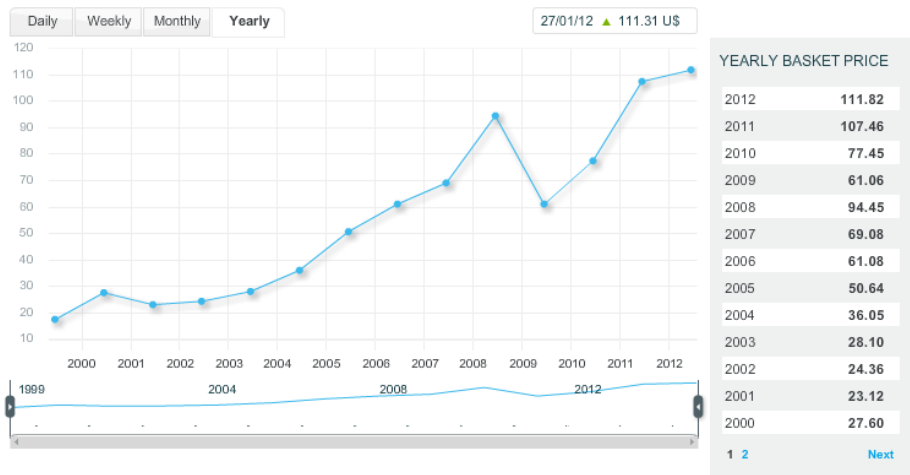


Abbildung 1.7: Rohölpreis seit 1998 in US \$ pro Barrel [21]

Wie man in Abbildung 1.7 feststellen kann ist ein rasanter Rohölpreisanstieg und damit auch Kraftstoffpreisanstieg seit 1998 eingetreten. Der OPEC Basket Price setzt sich aus einem Warenkorb von Rohölen verschiedener erdölexportierender Länder zusammen.

Der enorme Preisanstieg hat grundsätzlich mit der enormen Nachfrage und einem nur gering gestiegenen Fördervolumen zu tun. Die Nachfrage entsteht hauptsächlich durch das starke Wirtschaftswachstum in den Schwellenländern wie China und Indien [21].

### 1.2.1 Aussicht für den Dieselmotor

Für den modernen Dieselmotor sprechen der geringe Verbrauch und der vorhandene Fahrspaß. Über die Jahrzehnte hat der Dieselmotor eine beachtliche Entwicklung hinter sich gebracht. Der moderne Dieselmotor wird den heutigen Kundenbedürfnissen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Fahrverhalten, Lärmentwicklung und Zuverlässigkeit gerecht.

Die Zukunft des Dieselmotors hängt einerseits von den gesetzlichen Regelungen der Abgasgrenzwerte und andererseits von der Besteuerung der Kraftstoffe ab. Des Weiteren müssen die Produktions- und Entwicklungskosten von komplexen Abgasnachbehandlungssystemen so gering wie möglich gehalten werden. Wichtig ist, dass der Absatz

von Dieselfahrzeugen auf einem wirtschaftlichen Niveau gehalten wird, um Investitionen in neue Dieseltechnologien zu ermöglichen und damit die Vorteile des Dieselmotors voll auszuschöpfen. Um dies zu erreichen ist es unabdingbar, neue, außerhalb Europas liegende Märkte für den PKW-Diesel zu erschließen.

Im höherpreisigen Segment kommen hier besonders die USA infrage. Diese jedoch besitzen in einigen Bundesstaaten, wie zum Beispiel Californien, strengste Abgasgrenzwerte. Am amerikanischen Markt kann der Dieselmotor in schwereren und leistungsstarken Fahrzeugen unter anderem durch sein hohes Drehmoment eingesetzt werden. Des Weiteren besitzt mit Diesel betriebene aufgeladene Motoren einen Verbrauchsvorteil gegenüber großvolumigen Benzinmotoren. Das ist ein Vorteil für den Dieselmotor, da der Rohölpreis bei andauernder Nachfrage nicht merklich sinken wird.

In den USA treten dem Dieselantrieb zum Durchbruch aber auch Probleme in den Weg. Zum Einen sind Dieselfahrzeuge und hierbei besonders die europäischer Hersteller teurer als Benzin betriebene PKWs amerikanischer Hersteller. Zum Anderen sind Möglichkeiten Diesel zu tanken, und hierbei schwefelarmen Dieselmotorkraftstoff nicht so verbreitet wie in Europa. Noch dazu kommt ein dem Diesel anhaftendes Imageproblem welches in den USA weiterhin besteht. Die Chance besteht darin, den Verbrauchsvorteil, bei steigenden Treibstoffpreisen so auszunützen, dass es sich rechnet das teurere Fahrzeug zu kaufen und den in den USA gegenüber Benzin teureren Diesel zu tanken [32].

Bei konsequenter Weiterentwicklung in den Bereichen Verbrauchsminimierung und Abgasnachbehandlung ist der Dieselmotor in Zukunft, neben neuen Technologien, eine ausgereifte, zuverlässige Technologie und ein Baustein zur Sicherstellung der individuellen Mobilität von morgen.

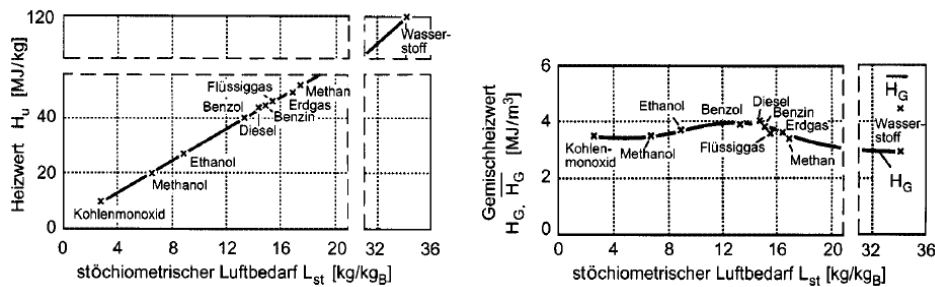


## 1.3 Diesel als Kraftstoff

Diesel ist ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen und wird aus Rohöl hergestellt. Ein Vorteil des Dieseldiesels gegenüber Benzin entsteht durch die höhere Dichte (siehe Tabelle 1.1) bei annähernd gleichem Heizwert (siehe Abbildung 1.8) und somit einem höheren Energiegehalt bei gleichem Volumen.

**Tabelle 1.1:** Dichte von Otto- und Dieseldiesels

Kraftstoff	Dichte in $\text{kg}/\text{dm}^3$
Benzin	0.720-0.775
Diesel	0.820-0.845



**Abbildung 1.8:** Heizwert und Gemischheizwert bei  $\lambda = 1$  [23]

Schwefel ist Bestandteil von Rohöl. Der im Dieseldiesels vorhandene Schwefel wird bei der Verbrennung hauptsächlich als Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) emittiert. Die sauren Produkte, die durch den Schwefel bei der Verbrennung entstehen, können zu korrosivem Verschleiß führen. Wegen der Schädigung der Abgasnachbehandlungssysteme muss der Dieseldiesels für die dauerhafte Wirksamkeit der Katalysatoren entschwefelt werden. In Katalysatoren kommt es dennoch zu Einlagerungen des Schwefels in Form von Sulfaten. Diese Einlagerungen können durch ein Anheben der Abgastemperatur auf ca.  $650\text{ }^\circ\text{C}$  herausgelöst werden. In der EU sind fast ausschließlich schwefelfreie Kraftstoffe vorhanden, was einen maximalen Schwefelgehalt von  $10\text{ mg}/\text{kg}$  bedeutet [17].

## 1.4 Die Umweltauswirkungen des Verkehrs

Der Verkehr und die Mobilität durch Verbrennungsmotoren hat unsere Umwelt in verschiedenen Bereichen beeinflusst. Durch die Bereitstellung von Straßen, die Lärmbelastung und Emission von Luftschadstoffen und Treibhausgasen wird die Lebensqualität beeinträchtigt. Besonders durch anthropogene Emissionen, also Emissionen nicht natürlichen Ursprungs, wird unsere Umwelt beeinflusst. Einen besonderen Stellenwert dabei hat das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid.

Kohlenstoffdioxid entsteht, abgesehen vom natürlichen  $\text{CO}_2$ -Kreislauf, zum Großteil bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien. Fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl basieren zum großen Teil auf organischen Kohlenstoff-Verbindungen. Bei der ideal stöchiometrischen Verbrennung dieser Stoffe entsteht das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid und zusätzlich Wasserdampf. Bei einer Verbrennung mit Sauerstoffüberschuss bleibt dieser überschüssige Sauerstoff unverändert.

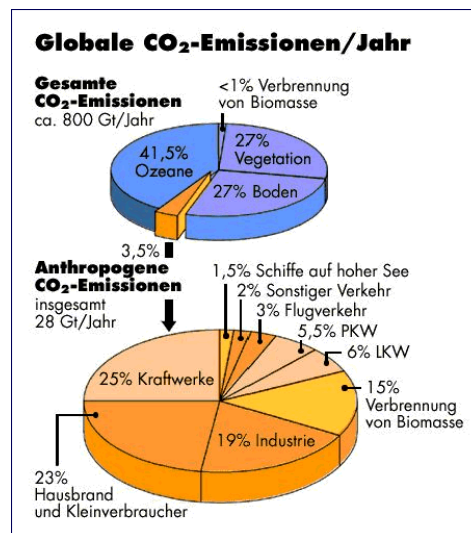


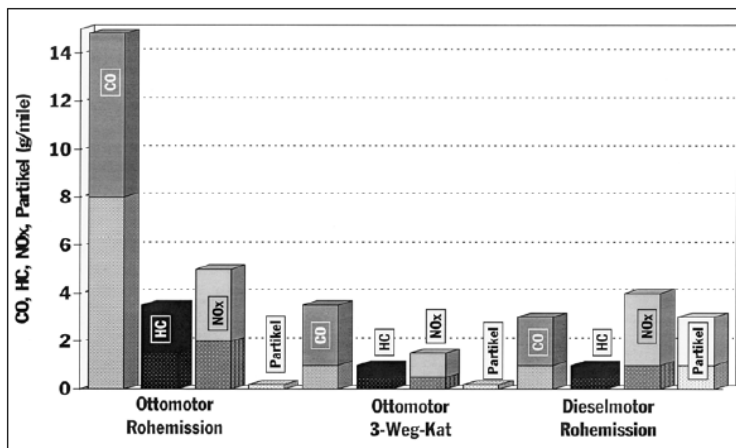
Abbildung 1.9:  $\text{CO}_2$ -Ausstoss in globaler Betrachtung [13]

Diese fossilen Energieträger sind jedoch auch Teil eines natürlichen Kreislaufs. Die schnelle Freisetzung dieser fossilen Energieträger durch den Menschen lässt im natürlichen  $\text{CO}_2$ -Kreislauf ein Ungleichgewicht entstehen.  $\text{CO}_2$  ist zwar kein Schadstoff, trägt aber wesentlich zum Treibhauseffekt bei und führt so zu einem messbaren Anstieg der weltweiten Jahresdurchschnittstemperatur. Bei einer realen Verbrennung werden aber andere Luftschadstoffe wie Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Kohlenwasserstoffe ( $\text{HC}$ ) und Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) gebildet. Als Stickoxide werden die Verbindungen  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$  bezeichnet.

In Abbildung 1.9 ist ein Anteil von 3,5% als anthropogene  $\text{CO}_2$ -Emission dargestellt. Diese 3,5% sind im Vergleich zum natürlichen gesamten Kreislauf ein relativ kleiner Anteil. Dieser geringe Anteil führt aber bereits zu einem Temperaturanstieg des Weltklimas.

Wenn man die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen als Basis betrachtet entfallen weltweit 5.5% auf den PKW- und 6% auf den LKW-Verkehr.

2007 wurde von der EU-Kommission eine Verordnung zur „Festsetzung von Emissionsnormen für Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen“ vorgelegt. Ab dem Jahr 2012 soll die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emission der Neuwagenflotte höchstens 120 g/km betragen. Der erlaubte Grenzwert wird in Abhängigkeit des Fahrzeuggewichts festgelegt. Schwerere Fahrzeuge dürfen demnach mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen als leichtere [29].

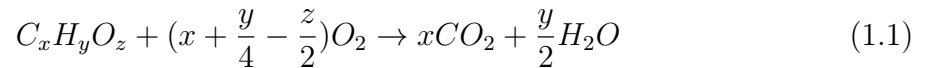


**Abbildung 1.10:** Schadstoffemissionen von Benzinmotor ohne und mit Katalysator und Dieselmotor [10]

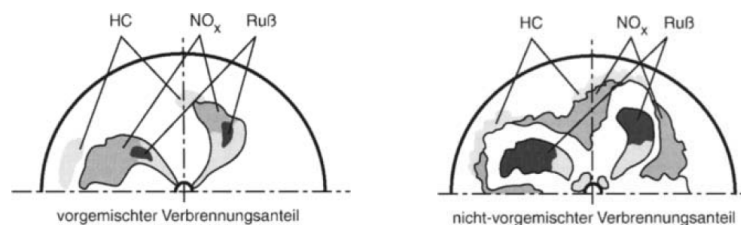
Durch den Katalysator (Abbildung 1.10) konnte eine beachtliche Reduzierung der Schadstoffe beim Benzinmotor mit  $\lambda = 1$  Betrieb erreicht werden. Beim Dieselmotor können aufgrund des Betriebs mit Luftüberschuss ohne Nachbehandlung relativ niedrige CO- und HC-Emissionen erreicht werden. Es sind jedoch Maßnahmen für die Reduzierung von Stickoxiden und Partikelemissionen notwendig.

## 1.5 Abgase

Die ideal stöchiometrische Verbrennung ist in Formel 1.1 beschrieben. Bei der idealen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Sauerstoff entstehen Kohlendioxid und Wasser. Der in der Luft enthaltene Stickstoff nimmt bei der Reaktion nicht teil.

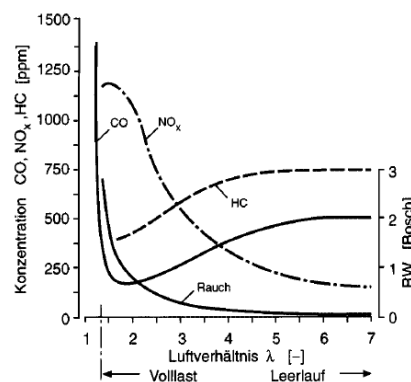


Da die motorische Verbrennung nicht ideal abläuft, entstehen Verbrennungsnebenprodukte. Aufgrund der unvollständigen Verbrennung entstehen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Ruß. Die „überevullständige“ Verbrennung ist verantwortlich für die Bildung von Stickoxiden (NO, NO<sub>2</sub>) [23].



**Abbildung 1.11:** Schadstoffbildung im direkteinspritzenden Dieselmotor [23]

Im konventionellen Dieselmotor läuft der Großteil der Verbrennung nicht vorgemischt ab. Der NO<sub>x</sub>-Bildungsschwerpunkt liegt in Zonen mit hoher Temperatur und nahezu stöchiometrischem Luftverhältnis. HC entsteht in mageren Zonen, während sich Rußpartikel in fetten Zonen in der Mitte der Kraftstoffstrahlen bilden (Abbildung 1.11) [23].



**Abbildung 1.12:** Schadstoffbildung über Luftverhältnis [23]

Obwohl bei der Verbrennung ein stark inhomogenes Gemisch vorliegt, kann die Schadstoffbildung des Dieselmotors über das mittlere Luftverhältnis, wie in Abbildung 1.12,

aufgetragen werden. Aufgrund des lokalen Luftmangels steigt die CO- und Ruß-Bildung bei niedrigen Luftverhältnissen an, gleichzeitig steigt der Stickoxidanteil aufgrund der steigenden Temperatur.[23]

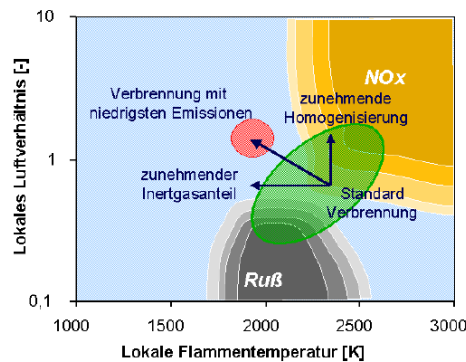


Abbildung 1.13: Schadstoffbildung von Ruß und NO<sub>x</sub> [25]

Bei der Verbrennung in konventionellen Dieselmotoren treten hohe sowie niedrige lokale Luftverhältnisse auf. Bei niedrigen Luftverhältnissen ( $\lambda < 1$ ) ist eine vermehrte Rußbildung feststellbar. In Gebieten mit Luftüberschuss ( $\lambda > 1$ ) steigt der NO<sub>x</sub>-Anteil. Wie in Abbildung 1.13 dargestellt, konzentriert sich die Motorenentwicklung auf Senkung der Stickoxidemissionen bei gleichzeitiger Reduzierung der Rußbildung.

## Kohlenmonoxid (CO)

Kohlenmonoxid entsteht bei unvollständiger Verbrennung, deren Ursache zum Beispiel Luftmangel durch Erlöschen der Flammenfront an kalten Brennraumwänden oder Quetschspalten ist. CO ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Atemgift [17].

Kohlenmonoxid reichert sich stark im Blut an, da es eine festere Bindung mit Hämoglobin eingeht als Sauerstoff oder Kohlendioxid, und reduziert so die Sauerstoffsättigung im Blut. Dies führt zu einer Unterversorgung der wichtigsten Organe und kann so zur Erstickung führen. Die Klimaschädlichkeit ist im Vergleich zu anderen Schadstoffen geringer, da sich die mittlere Lebensdauer der CO-Moleküle auf ca. zwei Monate beschränkt [25].

## Kohlenwasserstoffe (HC)

Bei nicht ausreichend aufbereiteten Kraftstoffgemischen und Temperaturen die für eine Verbrennung nicht mehr ausreichen, können bei Dieselmotoren unverbrannte Kohlenwasserstoffe entstehen. Dies ist meist in Bereichen mit Luftüberschuss, der bei Dieselmotoren im unteren Teillastbereich auftritt, der Fall. Weitere Quellen für Kohlenwasserstoffe können örtlich fette Gemischzonen sein, die beim Auftreffen von Kraftstoffstrahlen auf die Brennraumwand entstehen. Besonders bei Kaltstarts ist keine vollständige Verdampfung des Brennstoffes gewährleistet, was zu einem Anstieg der HC-Emissionen führt [17].

Des Weiteren kommen Kohlenwasserstoffe aus dem Schmierfilm an der Kolbenwand. Zum Teil können Kohlenwasserstoffe während der Expansion und des Ladungswechsels oxidieren, wenn die Temperatur und Sauerstoffkonzentration ausreichend hoch ist. Kohlenwasserstoffe sind hochreaktiv und werden als gesundheitsschädlich betrachtet. HC bildet mit den Stickoxiden den sogenannten Smog. Eine weitere Kohlenwasserstoffquelle sind die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, die bei Verbrennung unter Luftmangel durch Bildung höherer Kohlenwasserstoffe entstehen, und wichtig für die Rußbildung sind [23].

HC-Emissionen werden durch den Einsatz von Oxidationskatalysatoren sowohl bei Otto- als auch Dieselmotoren minimiert.

### Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Stickoxide entstehen in erster Linie bei hohen Temperaturen und ausreichend Sauerstoff. Für die Abkürzung NO<sub>x</sub> wird meist die Summe aus NO (Stickstoffmonoxid) und NO<sub>2</sub> (Stickstoffdioxid) verwendet, obwohl eine Vielzahl von unterschiedlichen Stickstoffoxiden vorhanden ist [17].

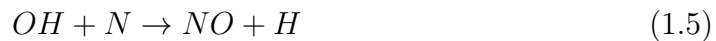
Das im Motor produzierte Abgas ist zum Großteil Stickstoffmonoxid, das in weiterer Folge zu Stickstoffdioxid oxidiert.

Hinsichtlich der Bildung von Stickoxiden werden drei Arten unterschieden:

- Brennstoff-Stickstoffmonoxid NO  
Aus dem im Kraftstoff gebundenen Stickstoff bilden sich während des Verbrennungsprozesses durch Zerfall einfache sekundäre Stickstoffverbindungen, die mit Sauerstoff weiter zu NO oxidieren. Der im Rohöl vorhandene Stickstoff wird bei der Destillation zu 90 % im Schweröl zurückgelassen. Des Weiteren werden die im Kraftstoff vorhandenen Stickstoffe nur zu ca. 70 % in Stickstoffmonoxid umgewandelt. Daraus ergibt sich eine bei heutigen Dieselmotoren vernachlässigbar kleine Menge an Brennstoff NO [33].
- Promptes Stickstoffmonoxid NO  
Bei dünnen, vorgemischten und sauerstoffarmen Flammenfronten können sich HC-Radikale bilden die mit Stickstoffmolekülen eine Verbindung als Cyanide (Salze) eingehen. In Nebenreaktionen mit diesen Salzen entsteht in Verbindung mit Sauerstoff Stickstoffmonoxide (NO). Der Beitrag des Prompten NO wird in der Regel als unwichtig angesehen [33].
- Thermisches Stickstoffmonoxid NO  
Der wichtigste Entstehungsmechanismus von NO<sub>x</sub> ist die Bildung von thermischem NO und wurde von Zeldovich erstmals beschrieben.  
Die vorhandenen Einzelreaktionen sind [17] :



Bei Verbrennung unter Luftmangel in brennstoffreichen Zonen, wie sie hinter der Flammenfront vorkommen, ist eine weitere Reaktion zu berücksichtigen:



Die Reaktion wird bei Vorhandensein von elementarem Sauerstoff begonnen, wobei NO und N aus N<sub>2</sub> und O entsteht. Der Stickstoff reagiert mit O<sub>2</sub> zu NO und O und schließt somit den Kreislauf. Dazu ist eine hohe Aktivierungsenergie nötig, weshalb dieser Mechanismus als thermisch bezeichnet wird. Die langsamste Reaktion bestimmt die Geschwindigkeit des gesamten Mechanismus. Diese Reaktion ist in 1.3 dargestellt und führt erst bei hohen Temperaturen zu einer merklichen NO-Bildung. Die Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen, deren Gleichgewicht von der Temperatur abhängt. Die Verbrennungen im Motor laufen allerdings meistens so schnell ab, dass die Gleichgewichtskonzentration nicht erreicht wird. Ebenso wird bei der Expansionsphase die Brennraumtemperatur gesenkt, was zu einem Einfrieren der Rückreaktionen führt und somit ein über der Gleichgewichtsreaktion liegendes NO<sub>x</sub>-Niveau verursacht [33],[17],[25].

- Thermisches Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>  
Chemische Gleichgewichtsbetrachtungen lassen einen geringen NO<sub>2</sub>-Anteil am NO<sub>x</sub> vermuten. Für den Ottomotor trifft dies grundsätzlich zu. Bei Dieselmotoren wird jedoch in der Flammenzone gebildetes NO zu NO<sub>2</sub> oxidiert. Dies kann bereits bis zu 40 % ausmachen.



Das gebildete Stickstoffdioxid wird wieder zu Stickstoffmonoxid reduziert.



Dieser Reduktionsvorgang läuft allerdings um die Hälfte langsamer ab als die Oxidation und wirkt sich besonders auf Dieselmotoren mit örtlich stark inhomogenen und insgesamt niedrigem Temperaturniveau aus [23].

Das thermodynamische Gleichgewicht liegt unter atmosphärischen Bedingungen auf der Seite des NO<sub>2</sub>. Dieses Gleichgewicht stellt sich bei den Verbrennungsabläufen, wie bereits erwähnt, nur bedingt ein. Des Weiteren jedoch kann die Bildung des NO<sub>2</sub> während der Verbrennung und dem Weg vom Brennraum über den Abgaskrümmer und Turbolader erfolgen. Bei ausreichender Zeit und vorhandenem Sauerstoff findet ein Abkühlen und dabei eine Aufoxidation statt.

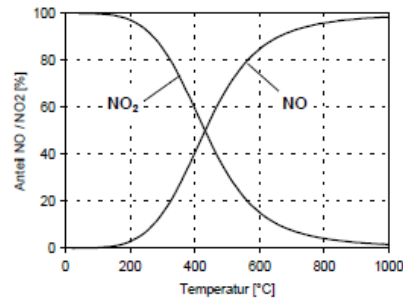


Abbildung 1.14: Theoretisches Gleichgewicht von NO<sub>2</sub>/NO [9]



Das in der Flammzone gebildete NO<sub>2</sub> bleibt erhalten, wenn die Flamme erlischt oder mit kälterem Gas gemischt wird. Dies wird durch hohe NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse im Niedriglastbereich von Dieselmotoren bestätigt [9].

## Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O)

Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O), das aufgrund seiner berausenden Wirkung in der Medizin als Beruhigungsmittel verwendet wird, ist besser unter dem Begriff Lachgas bekannt. Es ist ein farbloses Gas und gehört zur Gruppe der Stickoxide. N<sub>2</sub>O ist ein starkes Treibhausgas mit einem 310-mal höheren Treibhauseffekt als CO<sub>2</sub>, kommt aber, im Gegensatz zu Kohlenstoffdioxid, bei weitem nicht in einem so hohen Ausmaß als Schadstoff vor [33].

N<sub>2</sub>O wird in Anwesenheit eines Stoßpartners gebildet.



Bei mageren Brennstoff-Luftgemischen und niedrigen Temperaturen, die unter der Bildung von thermischen NO liegen, entsteht durch Oxidation aus N<sub>2</sub>O Stickstoffmonoxid (NO) [15].

N<sub>2</sub>O gehört zur Gruppe der Stickoxide und ist an der Bildung von Ozon (O<sub>3</sub>) beteiligt.



Durch die Sonneneinstrahlung wird das Lachgas gespalten (Reaktion 1.10) und reagiert mit dem Luftsauerstoff zu Ozon.

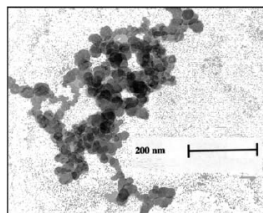
Die Stickoxidminimierung bei tiefen und hohen Temperaturen ist ein Ziel der Abgasnachbehandlung. Dazu wird teilweise auf Selektiv Katalytische Reaktionstechniken mittels Harnstoff zurückgegriffen. Dies führt jedoch zu einem Anstieg an N<sub>2</sub>O, was somit ein Nachteil dieser Technologie ist [26].



Aufgrund dessen wird  $N_2O$  in Zukunft bei Einsatz dieser SCR-Techniken eine höhere Relevanz bekommen.

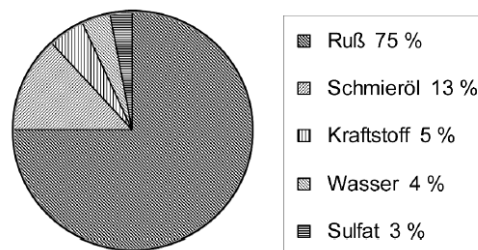
## Ruß und Partikel

Ruß und Partikel sind in erster Linie Probleme des Dieselmotors. Sie entstehen bei nicht vorgemischter inhomogener Verbrennung unter örtlichem Luftmangel, der in der Mitte der Kraftstoffstrahlen vorherrscht. Das gelbliche Leuchten von Flammen wird durch Rußpartikel verursacht.



**Abbildung 1.15:** Dieselpartikel-Agglomerate unter einem TEM [17]

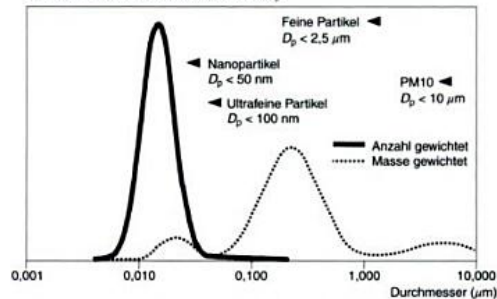
In komplexen physikalischen und chemischen Vorgängen wird bei der Verbrennung aus Kohlenwasserstoffen und wenigen Kohlenstoffatomen ein festes Agglomerat, das Graphit ähnelt (Abbildung 1.15). Die Rußbildung ist temperaturabhängig da, die nötigen Radikale erst ab Temperaturen von etwa 1000 K gebildet werden und bei höheren Temperaturen von etwa 2300 K wieder zerfallen oder oxidiert werden [23].



**Abbildung 1.16:** Partikelzusammensetzung des Dieselabgases [17]

Partikelemissionen sind nach gesetzlichen Bestimmungen die Gesamtmasse von Feststoffen und angelagerte, flüchtige oder lösliche Bestandteile eines Kraftfahrzeuges. Zumeist bestehen diese Partikel aus elementarem Kohlenstoff (Ruß). Die unverbrannten Kohlenwasserstoffe stellen den zweitgrößten Anteil in der Partikelzusammensetzung dar. Diese organischen Verbindungen können aus dem Schmieröl oder dem Kraftstoff stammen. Der Sulfatanteil ist auf den Schwefelgehalt des Kraftstoffes zurückzuführen. Die Abbildung 1.16 repräsentiert dabei einen Mittelwert von verschiedenen Fahrzeugen, wobei dieser je nach Betrieb stark variieren kann. Bei hoher Last wird dabei ein größerer

Anteil von elementarem Kohlenstoff nachweisbar sein als bei Teillastbetrieb, da mit höherer Last das Luftverhältnis sinkt [17].



**Abbildung 1.17:** Anzahl- und Masseverteilung von Dieselpartikeln [1]

Bei Messungen werden die meisten Partikel zwischen 0,1-1  $\mu m$  gefunden. Moderne Dieselmotoren mit Direkteinspritzung emittieren weniger Rußmasse als Motoren mit älteren Konzepten, was auf die verbesserte Gemischaufbereitung zurückzuführen ist. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Größenverteilung der Partikel bei neuen Verfahren nicht zu den kleineren Partikeln verschoben hat und somit der Größenbereich unverändert bleibt [1].

In Abbildung 1.17 ist die Verteilung nach Partikelanzahl und Partikelmasse dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass eine geringe Anzahl von Partikeln die größte Partikelmasse verursacht.

Obwohl der Verkehr nur einen Teil der Feinstaubbelastung verursacht, ist die Gefahr dieser Teilchen für die Gesundheit groß, da keine Unbedenklichkeitsschwelle vorhanden ist ab der die Partikel keine Auswirkung auf die Gesundheit haben. Kleine Partikel können tief in den menschlichen Körper eindringen. Teilchen unter 10  $\mu m$  können die Lungenbläschen erreichen und für Partikel unter 0,1  $\mu m$  ist es sogar möglich über die Lungenbläschen in die Blutbahn zu geraten, wodurch Störungen des Herz/Kreislaufsystems verursacht werden.[8]

## 1.6 Abgasvorschriften

Erste Vorschriften für die Emission von Abgasen aus Dieselmotoren wurden in den 1970er Jahren in den USA und später auch in Japan und Europa eingeführt. Die Beschränkungen beziehen sich schwerpunktmäßig auf Partikelemissionen und Stickoxide. Über den Abgastest soll eine Aussage über die Fahrzeugemissionen (HC, CO, NO<sub>x</sub>, Partikel in g/km oder g/mile) getroffen werden. Diese Emissionen werden auf Rollenprüfständen mit genormten Fahrzyklen überprüft. Um den unterschiedlichen Fahrverhaltensweisen in den einzelnen Ländern Rechnung zu tragen haben sich verschiedene Zyklen entwickelt, wobei bei den Grenzwerten zukünftig nicht mehr zwischen verschiedenen Technologien (Benzin- oder Dieselmotor) unterschieden werden soll.[17]

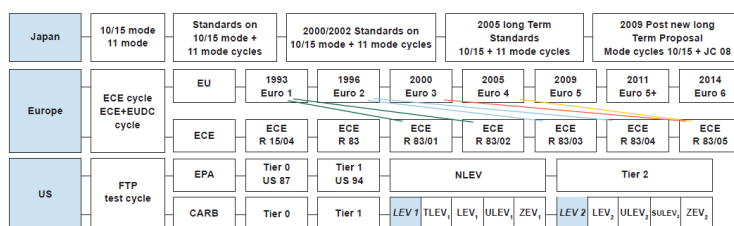


Abbildung 1.18: FTP-75-Testzyklus [5]

In Abbildung 1.18 wird eine Übersicht über die vorhandenen Abgasgesetzgebungen und ihre Strukturierung in den USA, Japan und Europa gegeben.

Im wesentlichen wird in den Abgasgesetzgebungen unterschieden:

- CARB-Gesetzgebung (California Air Resources Board), Kalifornien
- EPA-Gesetzgebung (Environmental Protection Agency), USA
- EU-Gesetzgebung (Europäische Union)
- Japan-Gesetzgebung

### 1.6.1 Abgasgesetzgebung USA

In den USA kommen zwei Gesetzgebungen zum Einsatz. Die EPA-Gesetzgebung wird in Bundesstaaten, die nicht die strengere CARB-Gesetzgebung aus Kalifornien anwenden, umgesetzt. Die Abgasgrenzwerte werden in den USA in „Tier“ Stufen unterschieden. Aktuell ist hier die Tier 2 Gesetzgebung, die weiter in „bin“ Unterstufen unterteilt wird, in Kraft. Der Hersteller kann zwischen den bin Stufen wählen, darf aber im Flottenmittel 0,07 g/Meile NO<sub>x</sub> nicht überschreiten (Abbildung 1.19). Hierbei muss im Mittel bin 5 erreicht werden. Der strengste Grenzwert ist bin 2. Ein wesentlicher Punkt in der amerikanischen Gesetzgebung ist die Gleichbehandlung von Diesel- und Benzinmotor,

0.07 g/mi NOx fleet average

g/mi	Durab	Bin 8	Bin 7	Bin 6	Bin 5	Bin 4	Bin 3	Bin 2
NMOG	50 k 120 k	0.100 0.125	0.075 0.090	0.075 0.090	0.075 0.090	0.070	0.055	0.010
CO	50 k 120 k	3.4 4.2	3.4 4.2	3.4 4.2	3.4 4.2	2.1	2.1	2.1
NOx	50 k 120 k	0.14 0.20	0.11 0.15	0.08 0.10	0.05 0.07	0.04	0.03	0.02
PM	120k	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
HCHO	50 k 120 k	0.015 0.018	0.015 0.018	0.015 0.018	0.015 0.018	0.011	0.011	0.004

Abbildung 1.19: bin Stufen [5]

was besonders für den Dieselmotor einen hohen Abgasnachbehandlungsaufwand in Bezug auf Partikel und Stickoxide mit sich bringt. [17][24]

Durch die Bevölkerungs- und damit auch Verkehrsdichte in Kombination mit dem Klima hat sich in Kalifornien eine eigene Gesetzgebung für die Abgasemissionen entwickelt. Die CARB-Gesetzgebung ist die Strengste weltweit und legt Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), nicht-methanhaltige organische Gase (NMOG), Formaldehyd sowie Partikel fest. Im Gegensatz zur EPA-Gesetzgebung werden in der CARB-Gesetzgebung für den Flottendurchschnitt die NMOG und nicht die NO<sub>x</sub>-Emissionen verwendet. Der Hersteller darf unter Einhaltung des Flottendurchschnitts unterschiedliche Fahrzeugkonzepte einsetzen, die die Emissionsgrenzwerte der Abgaskomponenten in den verschiedenen Abgaskategorien erfüllen.[24] NMOG sind in der Gesetzgebung die Summe aller Kohlenwasserstoffe (meist unverbrannte Kohlenwasserstoffe) mit Ausnahme von Methan (CH<sub>4</sub>).

Die Kategorien sind wie folgt eingeteilt:

- TLEV (Transitional Low-Emission Vehicle),
- LEV (Low-Emission Vehicle Fahrzeuge mit niedrigen Abgas- und Verdunstungsemissionen)
- ULEV (Ultra-Low-Emission Vehicle)
- SULEV (Super Ultra-Low-Emission Vehicle)

Zusätzlich zu den Kategorien LEV I und LEV II wurden zwei fast emissionsfreie Fahrzeuge definiert:

- ZEV (Zero-Emission Vehicle, d. h. Fahrzeuge ohne Abgas- und Verdunstungsemissionen) und
- PZEV (Partial ZEV, entspricht im Wesentlichen SULEV, jedoch höhere Anforderungen bezüglich Verdunstungsemissionen und Dauerhaltbarkeit).

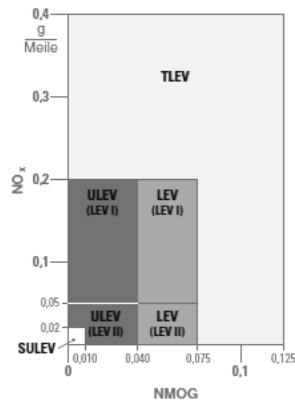


Abbildung 1.20: NO<sub>x</sub> und NMOG Grenzwerte der CARB Gesetzgebung [24]

Abbildung 1.20 zeigt die gesetzlichen Anforderungen der verschiedenen Fahrzeugkategorien.

Für die Messung der Emissionen wird der in Abbildung 1.21 abgebildete Fahrzyklus FTP-75 verwendet. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde der FTP-75 warm, ohne Kaltstartphase als Vergleichszyklus verwendet. Dieser Testzyklus besitzt ein deutlich höheres Geschwindigkeitsniveau als der NEFZ. Mit diesem Test wird versucht ein deutlich stärkeres transientes Fahrverhalten darzustellen.

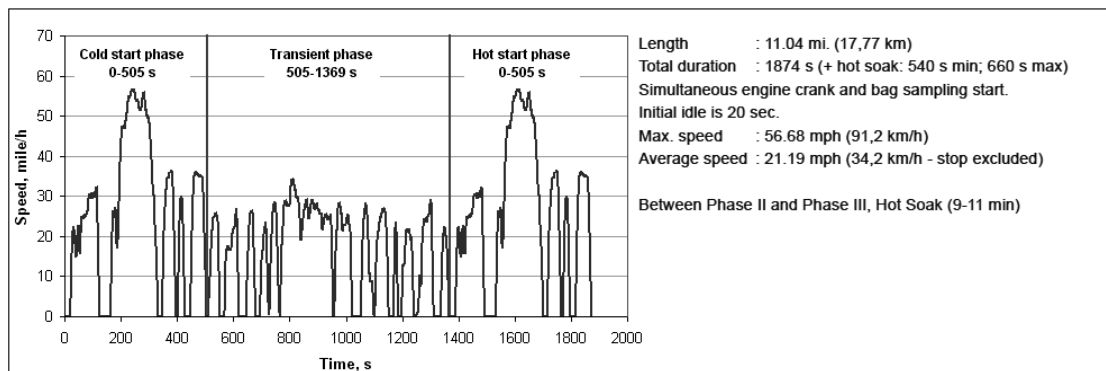


Abbildung 1.21: FTP-75-Testzyklus [5]

Zwischen 2001 und 2004 wurden weitere Testzyklen eingeführt, deren Grenzwerte ebenfalls eingehalten werden müssen. Neben dem City Cycle (FTP-75) wird noch der Highway Cycle, der mit 77.7 km/h eine deutlich höher Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist verwendet. Die Gesetzgebung in Kalifornien sieht noch weitere Fahrzyklen (SC03, US06) vor, die definierte Randbedingung wie Klimaanlage oder Hochlastbetrieb erfüllen müssen.

Ein wichtiger Punkt in der Gesetzeslage ist die Dauerhaltbarkeit die die Hersteller nachweisen müssen. Die Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte muss nach 50 000 Meilen

oder 5 Jahren (intermediate useful life) und nach 100 000 Meilen oder 10 Jahren (full useful life) nachgewiesen werden. [24]

## 1.6.2 Abgasgesetzgebung Europa

Seit 1992 legt die EU-Kommission die Richtlinien für die Europäische Abgasgesetzgebung fest. In den sogenannten Euro Stufen werden Grenzwerte für HC, CO, NO<sub>x</sub> und Partikel festgelegt.[24]

Typ I Test (EU): Auspuffemission nach Kaltstart

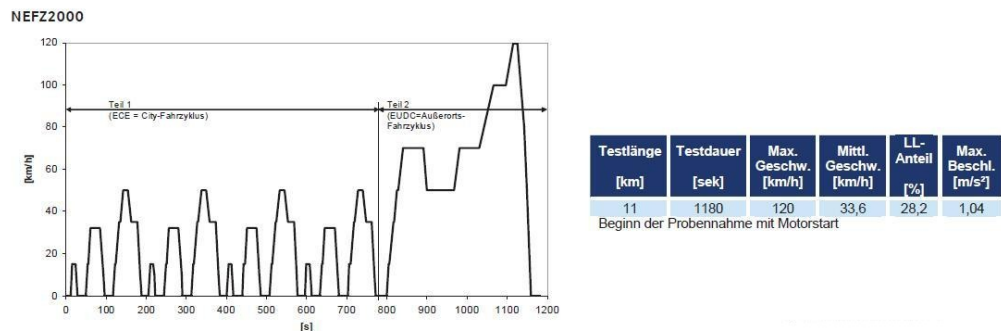


Abbildung 1.22: NEFZ [34]

Der in Abbildung 1.22 dargestellte Fahrzyklus NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus) oder NEDC (new european driving cycle) ist ein synthetischer Fahrzyklus, der sich aus einem City- und einem Außerorts Fahrzyklus zusammensetzt.[34]

	Europäischer Fahrzeugzyklus NEFZ			
	CO [g/km]	HC + NOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]
Euro 4	0,5	0,30	0,25	0,025
Euro 5	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6*	0,5	0,17	0,08	0,005

\* gem. Verordnung 715/2007/EG

Abbildung 1.23: Euro Grenzwerte [17]

Seit 1.9.2009 ist die Abgasgesetzgebung Euro-5 in Kraft, die ab 1.9.2014 von der Euro-6 abgelöst wird (Abbildung 1.23). Zukünftige Bestrebungen gehen in Richtung Annäherung von Diesel- und Benzinabgasgesetzgebung. Des Weiteren wird eine Partikelzählung und Änderung des Testzykluses in der zukünftigen Gesetzgebung überlegt.

## 1.7 Dieselaabgasnachbehandlungssysteme

Für die Behandlung der Dieselaabgase werden eine Vielzahl von Systemen verwendet. Es werden oxidierende sowie reduzierende Systeme und Filter für die Erreichung der Abgasgrenzwerte eingesetzt.

### Dieseloxidationskatalysatoren

Dieselmotoren werden zumeist mit Sauerstoffüberschuss betrieben. Auch beim Dieselmotor werden, wie beim Katalysator eines Ottomotors die HC und CO Emissionen oxidiert. Es werden Katalysatoren mit Edelmetallen aus Platin, Rhodium oder Palladium verwendet. Die Konvertierungsrate ist vom Luftverhältnis abhängig. Bei einem Luftverhältnis von  $\lambda > 1$  können nur HC und CO konvertiert werden. Eine weitere Aufgabe ist die Oxidation von Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid. Deshalb sind für die Reduktion von Stickoxiden weitere Maßnahmen nötig. [23]

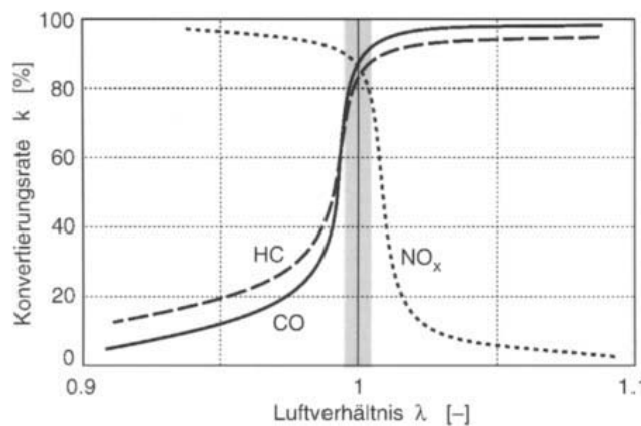
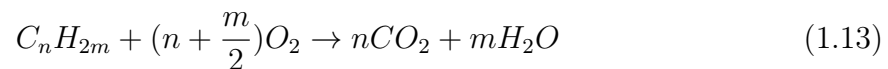


Abbildung 1.24: Konvertierungsrate eines Katalysators [23]

HC- und CO-Konvertierung in einem Dieseloxidationskatalysator: (Oxidation)[16]



In modernen Abgasnachbehandlungssystemen besitzt der DOC noch weitere Funktionen. Zum Einen wird versucht durch Oxidation die flüchtigen Bestandteile der Partikel

zu minimieren und zum Anderen soll eine Verbesserung des Stickstoffdioxid zu Stickstoffmonoxid Verhältnisses durchgeführt werden. Dies ist besonders für oft nachfolgende SCR-Prozesse notwendig. Durch bewusst zugeführte Kohlenwasserstoffe soll durch Oxidation Wärme freigesetzt werden. So wird die Abgastemperatur nach dem DOC erhöht und die für die Partikelfilterregeneration benötigte Temperatur schneller erreicht. Durch geeignete Beschichtungen ist eine Reduktion von  $\text{NO}_x$  in geringem Ausmaß möglich (5-10 %) [17].

In der Regel besteht ein Katalysator aus einer metallischen oder keramischen Wabenstruktur durch welche das Abgas in ca. 1 mm breiten Kanälen geleitet wird. Auf einem oxidischen Washcoat (Aluminiumoxid, Ceroxid oder Zirkoniumoxid) werden die kleinen Partikel der Edelmetalle verteilt. Ein wichtiger Faktor ist die Katalysatortemperatur, die vom Betriebszustand des Motors abhängt. Beim Steigen der Abgastemperatur nach dem Abgasturbolader folgt eine aufgrund der thermischen Masse des Abgasstranges verzögerte Erhöhung der Katalysatortemperatur [17].

$\text{NO}_2$  ist für eine Reihe von Nachbehandlungssystemen ein wichtiger Bestandteil (DPF, SCR). Bei niedrigen Temperaturen liegt das Gleichgewicht auf der Seite des  $\text{NO}_2$ . Durch katalytische Reaktionen kann der DOC das Gleichgewicht zu Gunsten des  $\text{NO}_2$  erhöhen. Dies ist jedoch nur in einem niedrigen Temperaturbereich von ca. 180-230°C möglich. Über diesen niedrigen Temperaturen sinkt dann das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis wieder. Des Weiteren sinkt der  $\text{NO}_2$ -Anteil durch die Reduktion von CO und HC. Die Wirksamkeit wird durch die sogenannte Katalysatoralterung bei langer Laufzeit verringert. Der erste Mechanismus verringert bei hohen Temperaturen die spezifische Oberfläche der Edelmetallpartikel durch Agglomeration dieser Teilchen und verringert so die Oxidationsfähigkeit. Der zweite Alterungsmechanismus wird durch Katalysatorgifte wie Schwefel, die auf der Oberfläche Sulfate bilden und damit die Zugänglichkeit zu den Edelmetallpartikeln erschweren, verursacht [17].

## Dieselpartikelfilter

Die Hauptaufgabe des Partikelfilters ist das Reduzieren der Partikel aus dem Dieselabgas. Partikel entstehen im allgemeinen bei niedrigen Drehzahlen bei denen nur ein geringer Ladedruck aufgebaut wird und dadurch der Motor bei einem niedrigen Luftverhältnis betrieben wird. Auch im nennleistungsnahen Bereich sind hohe Partikelemissionen vorhanden. Durch die unvollständige Verbrennung bilden sich aneinandergekettete Kohlenstoffteilchen an denen sich noch Kohlenwasserstoffe anlagern [7],[24].

Diese Abscheidung kann nur durch Filtration realisiert werden. Da sich der Filter befüllt werden die lange Phasen der Partikelabscheidung durch kurze Phasen der Regeneration unterbrochen [17].



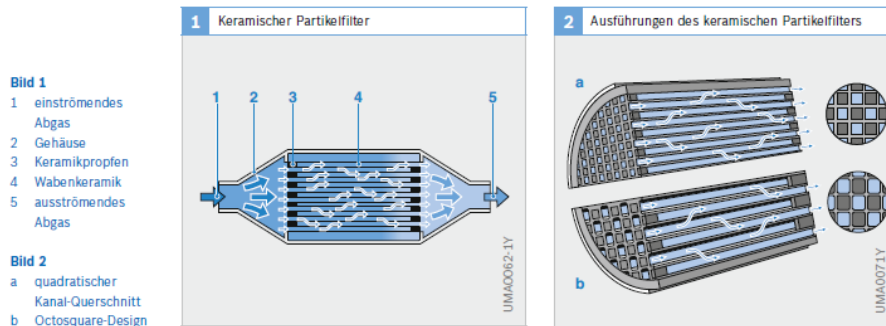


Abbildung 1.25: Ausführung eines keramischen Partikelfilters [24]

Derzeit kommen verschiedene Typen von Partikelfilter zur Anwendung. Großteils werden keramische Extrudate aus Cordierit oder Siliziumcarbit verwendet (Abbildung 1.25). Grundsätzlich sind vier Möglichkeiten für die Filterregeneration möglich:

- Der Ruß kann durch nichtkatalytische Oxidation durch Restsauerstoff bei hohen Temperaturen von 550-650°C abgebrannt werden.
- Durch Additive (z.B. Eisenverbindungen) lassen sich die Zündtemperaturen des Rußes auf ca. 450-500°C absenken.
- Eine weitere Möglichkeit ist die Oxidation mittels  $\text{NO}_2$  die bereits bei Temperaturen von 250-350°C stattfindet.
- Die katalytische Beschichtung ist eine weitere Möglichkeit zur Rußreduktion.

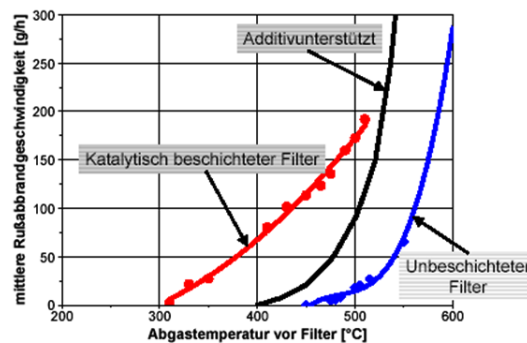


Abbildung 1.26: Abbrandtemperaturen eines Partikelfilters [7]

Durch die katalytische Beschichtung kann die Regenerationstemperatur herabgesetzt werden (Abbildung 1.26). Zudem wird über die katalytische Beschichtung CO und HC oxidiert. Des weiteren bildet sich ebenfalls durch Oxidation  $\text{NO}_2$  aus NO an der katalytischen Beschichtung. Dies unterstützt die Rußoxidation bei niedrigen Temperaturen [17].

## 2 Aufgabenstellung und Motivation

Für die Entwicklung in der Automobilindustrie ist ein effektiver und kostengünstiger Entwicklungsprozess von Vorteil. Besonders im Bereich der Abgasnachbehandlung werden große Anstrengungen unternommen um die zukünftigen gesetzlichen Bestimmungen zu erfüllen. In diesem Entwicklungsbereich soll das leistungsfähigste unter kostenäquivalenten Abgasnachbehandlungssystemen für das jeweilige Fahrzeug gefunden werden.

Es ist daher notwendig eine Vielzahl von Vergleichsmessungen am Rollenprüfstand durchzuführen. Aus diesem Grund ist ein hohes zeitliches als auch finanzielles Einsparungspotential durch Reduktion dieser Rollenmessungen vorhanden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher bereits am stationären Motorprüfstand eine Vorauswahl der Abgasnachbehandlungssysteme treffen zu können.

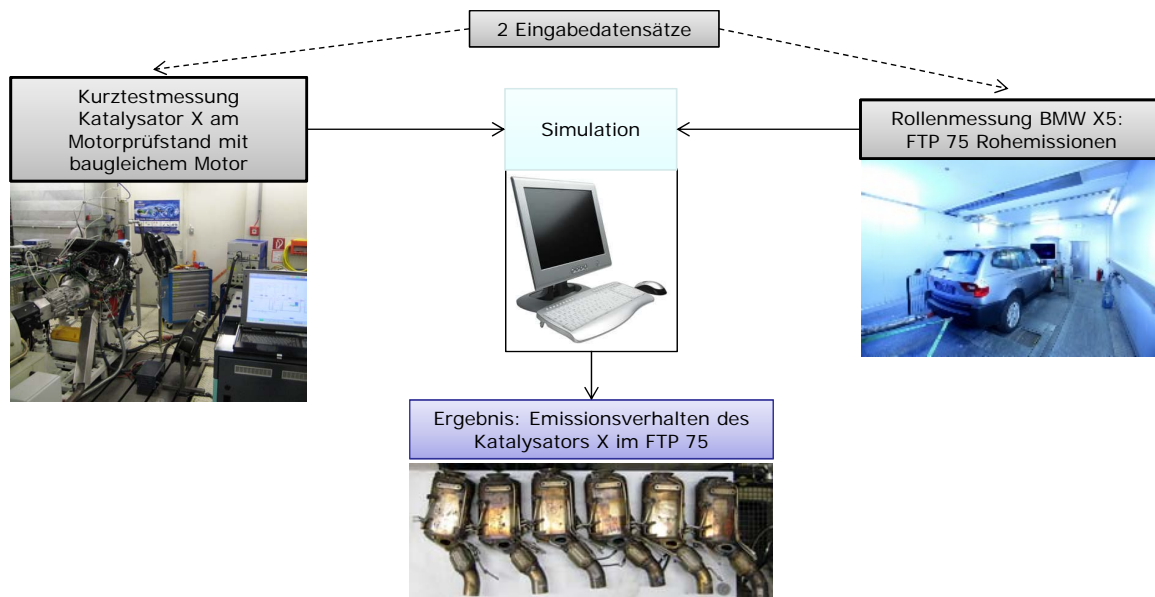


Abbildung 2.1: Ziel der Diplomarbeit

Die Vorteile des stationären Motorprüfstandes im Vergleich zur Fahrzeugrolle sind der günstigere Prüfstandsbetrieb, die einfachere Handhabbarkeit und Adaption der Versuchsträger. Um am Rollenprüfstand ein Fahrzeug mit verschiedenen Systemen beziehungsweise umzurüsten ist ein hoher Aufwand nötig. Des Weiteren befindet sich der Motorenprüfstand in der Entwicklungsphase von Motoren zu einem früheren Zeitpunkt als Rollenmessungen. Somit kann bereits in einem früheren Entwicklungsstadium der

---

Motorenentwicklung eine Vorauswahl für das verwendete Abgasnachbehandlungssystem getroffen werden.

Zielsetzung dieses Projektes ist es daher, auf Basis eines am stationären Motorprüfstand gemessenen Kurztestes Vorhersagen über das Emissionsverhalten verschiedener Katalysatoren treffen zu können. In dieser Diplomarbeit wird versucht diese Vorhersagen für ein bestimmtes Fahrzeug und einen bestimmten Fahrzyklus zu treffen. Als Fahrzyklus war ein FTP-75 zu untersuchen. Um die Vorhersagen treffen zu können wurde eine Simulationsrechnung in Form einer Interpolation durchgeführt. Um diese Simulation realisieren zu können werden 2 Eingangsdatensätze benötigt.

Wie in Abbildung 2.1 veranschaulicht stellt der erste Eingabedatensatz eine Messung des gewählten FTP-75-Fahrzyklus auf der Fahrzeugrolle der zu untersuchenden Fahrzeug-Motorkombination dar. Für die nachfolgende Simulationsrechnung ist die Messung der Rohemissionen des Fahrzeugs auf der Fahrzeugrolle von Interesse. Da es sich hierbei um Messungen der Rohemissionen handelt, muss dieser Rollentest, für den späteren Vergleich verschiedener Katalysatoren, nur einmal durchgeführt werden.

Den zweiten, für die Simulation notwendigen, Eingabedatensatz stellen die am stationären Motorprüfstand vermessenen Katalysatoren dar. Hier wird die Wirksamkeit der Abgasnachbehandlungssysteme durch Messungen der Emissionen vor dem Oxidationskatalysator (Rohemissionen), zwischen Oxidationskatalysator und Dieselpartikelfilter und nach dem Dieselpartikelfilter festgestellt.

Durch die Emissionsdifferenz zwischen vor dem DOC und nach dem DPF und den Rohemissionsmessung der Rolle kann mit Hilfe einer Interpolation auf das Verhalten der jeweiligen Katalysatoren im FTP-75-Fahrzyklus geschlossen werden. Hierbei muss angemerkt werden, dass die Erstellung des Kurztestes, sowie die Rohemissionsmessung des Fahrzeugs am Rollenprüfstand nicht Teil dieser Diplomarbeit waren.

Als Versuchsträger war im Fahrzeug und am Motorprüfstand ein 6-Zylinder Dieselmotor des Typs BMW M57TopUS zu vermessen. Insgesamt wurden in diesem Projekt 10 verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme, die jeweils aus einem Dieseloxidationskatalysator und einem Dieselpartikelfilter aufgebaut waren, untersucht. Die nachfolgenden Kapitel umfassen sowohl experimentelle, als auch simulatorische Tätigkeiten. Die experimentellen Tätigkeiten umfassen Untersuchungen des Kurztestes auf Basis der am Motorprüfstand gemessenen Daten. Hier waren verschiedene Effekte zu untersuchen und auszuwerten. Die simulatorischen Tätigkeiten befassen sich mit der Durchführung von Simulationen unter Zugrundelegung der Rohemissionsmessungen der Rollen- und den Differenzmessungen des Kurztestes am Motorprüfstand.

## 2.1 Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

In Abbildung 2.2 wird ein Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und Datenströme gegeben. Dieser Überblick stellt die Komplexität der durchgeführten Untersuchungen dar und soll als Landkarte für die nächsten Kapitel dienen.

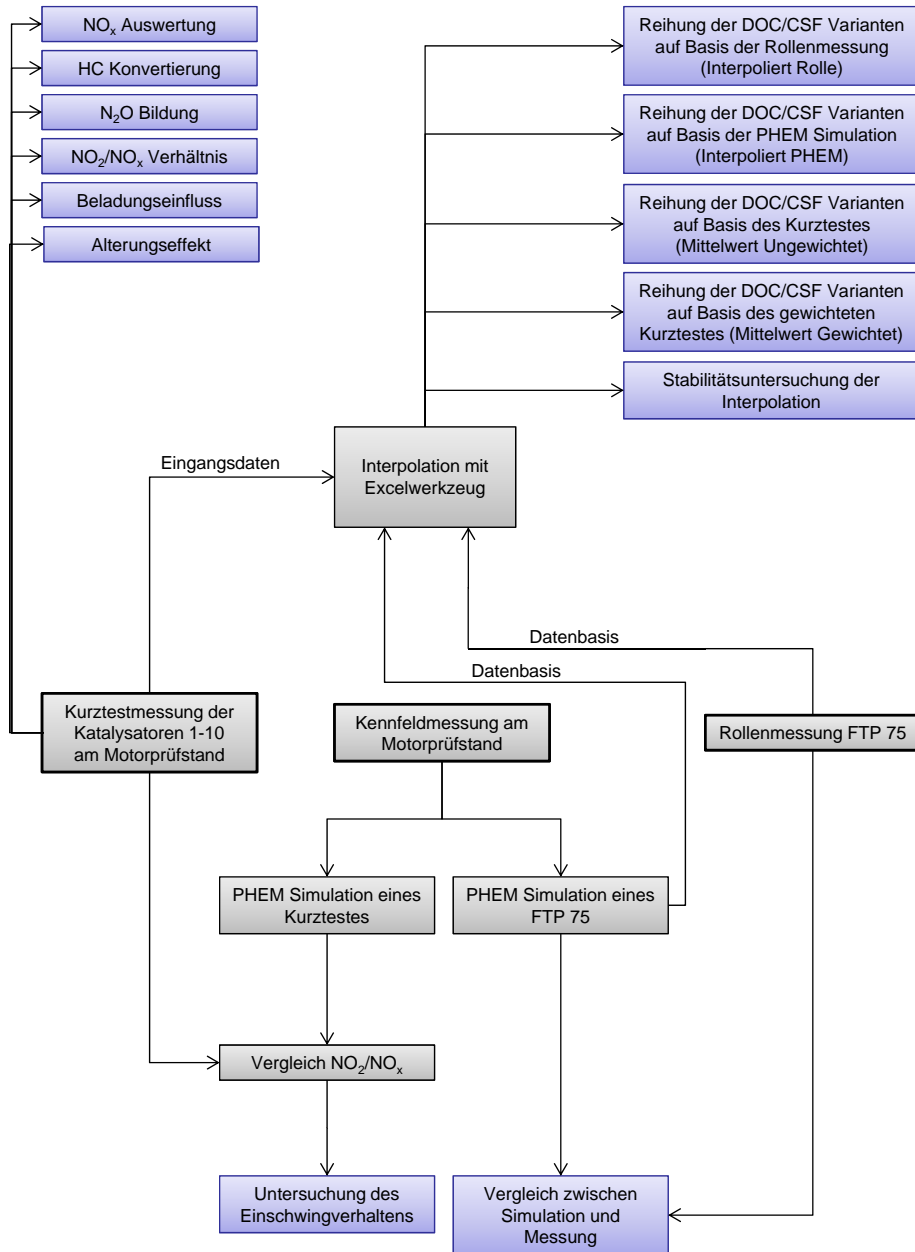


Abbildung 2.2: Gesamtschema der durchgeführten Untersuchungen

Die Auswertungen der Kurztestmessungen, die sich direkt auf Messdaten des stationären Motorprüfstands beziehen, werden in Kapitel 4 näher behandelt. Hier werden die zeitlichen Verläufe der Kurztests bezüglich  $\text{NO}_x$  Einspeicherung, HC Konvertierung,  $\text{N}_2\text{O}$  Bildung untersucht. Des Weiteren wird auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis, den Belastungseinfluss und den Alterungseffekt eingegangen.

In Kapitel 5 wird die Vorgehensweise zur Simulation, die durch eine Interpolationsrechnung realisiert wurde, erläutert.

In einem weiteren Teil dieser Arbeit wurde versucht den Rollentest durch eine Längsdynamiksimulation auf Basis eines stationären Motorkennfeldes zu ersetzen. Diese Simulation wurde mit dem Programm PHEM (Passanger Car & Heavy Duty Emission Model) durchgeführt. Nähere Informationen dazu sowie der Vergleich mit dem realen Rollentest werden in Kapitel 6 dargelegt.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein temperaturabhängiges Einschwingverhalten des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses festgestellt. Des Weiteren wurde die Stabilität der Interpolationsrechnung überprüft.

Die Ergebnisse und die Reihungen der Katalysatoren bezüglich verschiedener Kriterien wird in Kapitel 8 durchgeführt.

# 3 Prüfstandsuntersuchungen

## 3.1 Versuchsmotor

Bei den Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand wurde ein Fahrzeug mit einem dem auf dem Motorprüfstand identischen Motor verwendet. Bei dem Motor handelt es sich um ein BMW 6-Zylinder Dieselmotor in Reihenanordnung des Typs M57TopUS. Dieser Motor wird in den leistungsstärksten Dieselfahrzeugen des Herstellers verbaut. Der Einbau im Fahrzeug findet nur längs statt. Zum Zeitpunkt der Diplomarbeit war schon das Nachfolgetriebwerk N57 für den europäischen Markt vorhanden. Das Triebwerk M57TopUS ist für den amerikanischen Markt angepasst. Der wichtigste Unterschied zum europäischen Modell M57Top ist die Niederdruck-AGR, mit der der M57TopUS zusätzlich zur Hochdruck-AGR ausgerüstet ist.

### 3.1.1 Aufladung

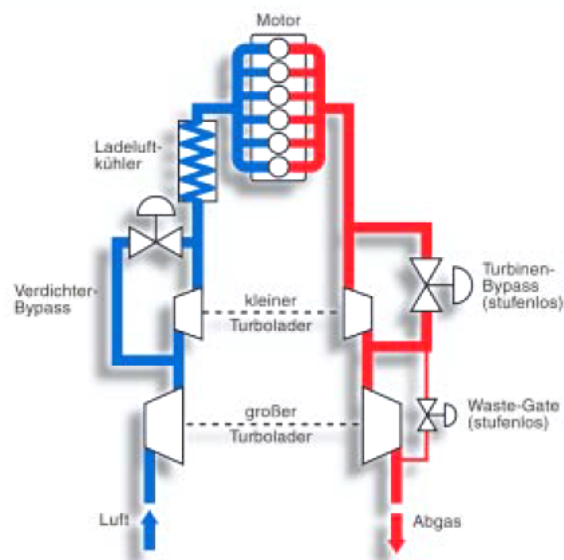


Abbildung 3.1: zweistufige Aufladung M57Top [19]

Die Aufladung stellt einen wesentlichen Punkt in der Leistungsdichte von Benzin- und Dieselmotoren dar. Bei diesem Triebwerk wurde eine zweistufige Aufladung ausgeführt,

die in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist. Auf der Lufteinlassseite wird die Luft über den Verdichter des großen Turboladers und den kleinen Verdichter, der über einen Bypasskanal übergangen werden kann, durch den Ladeluftkühler zur Sauganlage des Motors geführt. Abgasseitig strömt das Abgas über den Abgaskrümer zunächst in den kleinen Turbolader weiter in die große Turbine. Der kleine Turbolader wird dabei kennfeldabhängig über eine stufenlos regelbare Klappe umgangen [19].

Im niedrigen Drehzahlbereich wird dabei nur der kleine Lader verwendet. Bei mittleren Drehzahlen wird ein Teil direkt über den Bypass auf den großen Verdichter geleitet. Bei höheren Drehzahlen übernimmt der große Verdichter die gesamte Ladedruckbereitstellung (Abbildung 3.2).

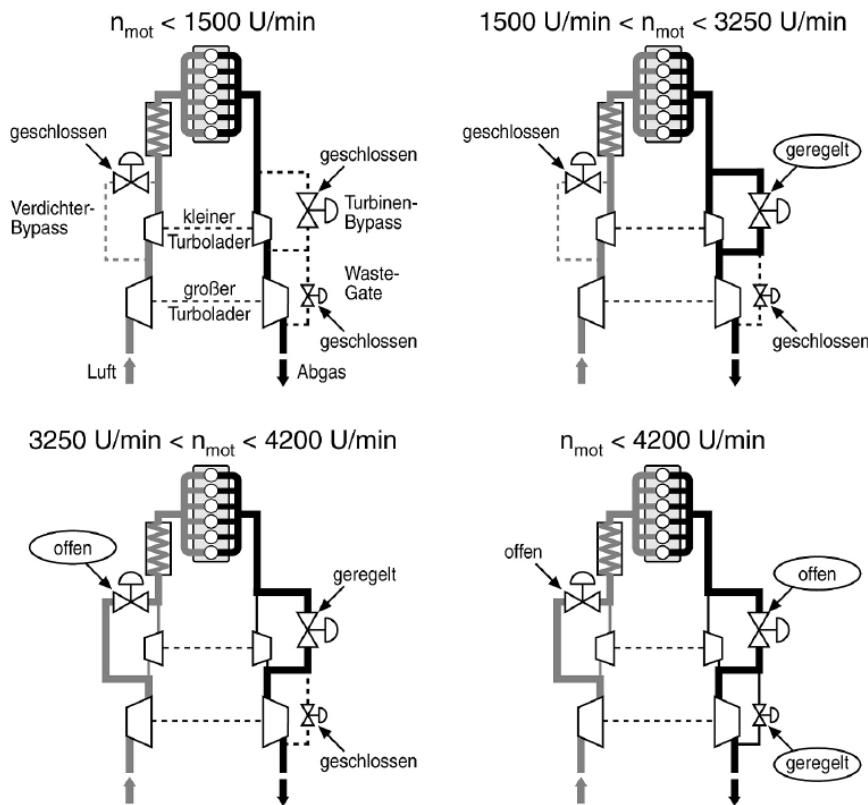


Abbildung 3.2: Betriebsmoden der zweistufigen Aufladung M57Top [27]

Die Grundabmessungen des Triebwerks sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

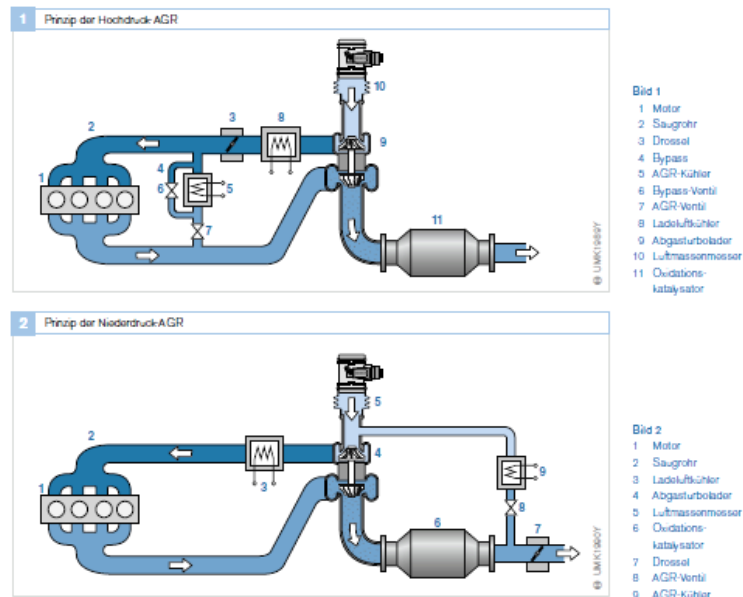
Der von BMW zur Verfügung gestellte Versuchsmotor wurde auf ein Drehmoment von 480 Nm für den Prüfstandsbetrieb begrenzt. Da ein Kurztest gemessen wurde, der repräsentativ für den FTP-75 sein sollte, bewegte sich die dafür benötigte Leistungsanforderung deutlich darunter.

**Tabelle 3.1:** Grundabmessungen und Grundmotordaten BMW M57TopUS

Kenngröße	Wert
Hubraum	2993 cm <sup>3</sup>
Bohrung	84 mm
Hub	90 mm
Leistung	200 kW bei 4000 min <sup>-1</sup>
Drehmoment	560 Nm bei 2000 min <sup>-1</sup>

### 3.1.2 Abgasrückführung

Die wichtigste innermotorische Maßnahme zur Reduzierung der Stickoxid-Emissionen ist die Abgasrückführung. Hierbei wird zwischen einer internen AGR, die durch die Ventilsteuerzeiten und den Restgasanteil bestimmt wird und der externen AGR, die durch zusätzliche Leitungen das Abgas wieder in das Saugrohr führt, unterschieden. Durch das zusätzliche Abgas sinkt die Sauerstoffkonzentration und die Flamme muss eine größere Ladungsmasse erfassen. Der erhöhte Inertgasanteil senkt den Sauerstoffpartialdruck, die Brenngeschwindigkeit und damit die lokalen Spitzentemperaturen. Da für die NO<sub>x</sub>-Bildung hohe lokale Temperaturen und ein genügend hoher Sauerstoffpartialdruck notwendig sind kann somit die Stickoxid-Bildung deutlich verringert werden. Durch Verringern der reaktiven Komponenten wird der Anteil des rückgeführten Abgases durch die Rußemissionen begrenzt. Um die Wirksamkeit der AGR zu verbessern wird das Abgas gekühlt [24],[7].



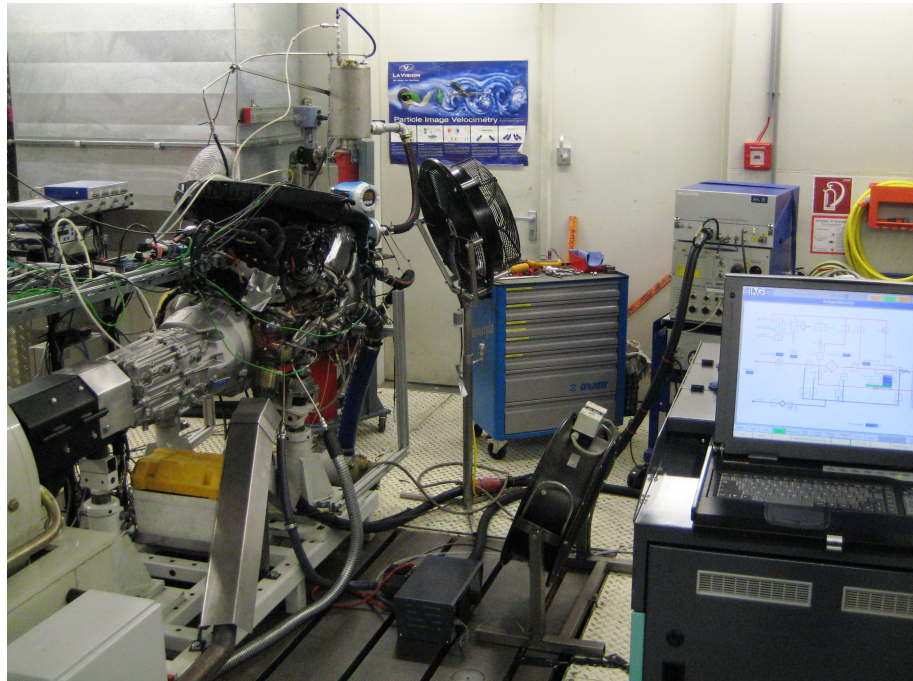
**Abbildung 3.3:** Hochdruck- und Niederdruck AGR [24]



Bei der Hochdruck-AGR wird, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, das Abgas vor dem Turbinengehäuse des ATL entnommen und dem Motor vor dem Luftsammler zugeführt. Die maximale Menge hängt von der Druckdifferenz zwischen dem Abgasgedrückt vor der Turbine und dem Saugrohrdruck ab. Diese Menge kann durch das AGR-Ventil geregelt werden. In den emissionsrelevanten Kennfeldbereichen ist dieses Druckgefälle ausreichend. Zur weiteren Verbesserung der AGR-Systeme werden bereits Niederdruck-AGR Systeme zur Stickoxidemissionsminderung eingesetzt. Dabei wird das Abgas nach der Turbine und dem Abgasnachbehandlungssystem entnommen und vor dem Verdichter nach einem AGR-Kühler über den Ladeluftkühler wieder zugeführt. Ein Vorteil ist die Gleichverteilung zwischen den einzelnen Zylindern und die intensive Kühlung durch AGR-Kühler und Ladeluftkühler [24]. Nachteil einer Niederdruck-AGR ist das zuführen des Abgases über den Verdichter der durch eventuell mitgelieferten Partikeln beschädigt werden kann. Die Regelung einer Niederdruck-AGR stellt aufgrund des trägen Verhaltens eine große Herausforderung an die Motorenregeltechnik dar.

## 3.2 Prüfstandsaufbau

Bevor die Messungen beginnen konnten war ein Prüfstandsaufbau notwendig. Um den Prüfbetrieb zu realisieren wurde eine wassergekühlte Wirbelstrombremse vom Typ Borg-  
hi & Saveri FE350 verwendet bei der es prinzipbedingt nicht möglich ist, den Motor im  
Schubbetrieb zu betreiben. Über das Motorgetriebe wurde der Motor über eine Gelenk-  
welle und eine Hardyscheibe mit der Bremse verbunden.



**Abbildung 3.4:** Prüfstandsaufbau mit Messgeräten

Durch zwei leistungsstarke Lüfter wurde bei der Regeneration der DOC/CSF-Varianten für ausreichend Kühlung der Aufladegruppe gesorgt. Die Regeneration wurde durch ein Fahren an der Vollast realisiert, was zu einem hohen Temperaturanstieg führte. Für die Messung der Temperaturen wurden NiCr-Ni-Thermoelemente verwendet. Zur Kraftstoffkonditionierung und Messung war ein Messgerät des Typs AVL Fuel Exact am Prüfstand aufgebaut. Abbildung 3.4 zeigt den Prüfstandsaufbau samt Messgeräten.

## 3.3 Katalysatoren

Im Zuge der Messungen wurden 10 verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme untersucht.

### 3.3.1 Einteilung der Katalysatoren

Die DOC/CSF-Varianten waren in fünf gealterte und fünf neuwertige (sog. degreened) Varianten unterteilt. Unter "degreened", Katalysator wird hier eine einer umfassenden Regeneration unterzogene DOC/CSF-Variante verstanden. Diese Systeme wurde in diesem Zustand zur Verfügung gestellt.

Die Katalysatoren waren in vier Paarungen mit jeweils einem neuwertigen und einem gealterten System unterteilt. Zwei Katalysatoren waren keiner Paarung zugeordnet. Die DOC/CSF Varianten waren mit Identifikationsnummern (Tabelle 3.2) versehen, welche in dieser Diplomarbeit als Bezeichnungen weiter verwendet werden. In Abbildung 3.5 sind sechs Katalysatoren mit den Messstellen und dem Niederdruck-AGR-Anschluss zu sehen.



**Abbildung 3.5:** Sechs der zehn vermessenen Katalysatoren

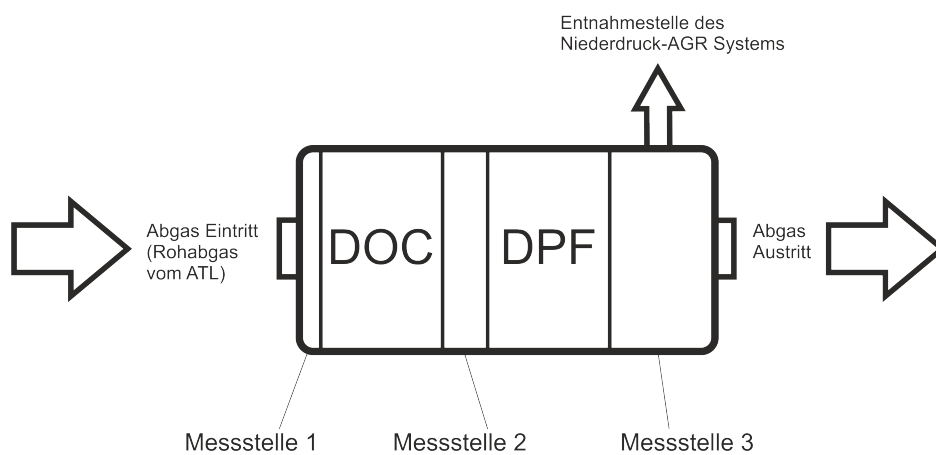
An den Katalysatoren waren jeweils 3 Messstellen zur Abgasentnahme angebracht (Abbildung 3.6). Die erste Messstelle befand sich vor dem Oxidationskatalysator (Messstelle 1), die zweite Messstelle zwischen Oxidationskatalysator und dem Dieselpartikelfilter (Messstelle 2) und für die dritte Entnahmemöglichkeit wurde nach dem Partikelfilter eine Messstelle vorgesehen (Messstelle 3).

### 3.3.2 Aufbau

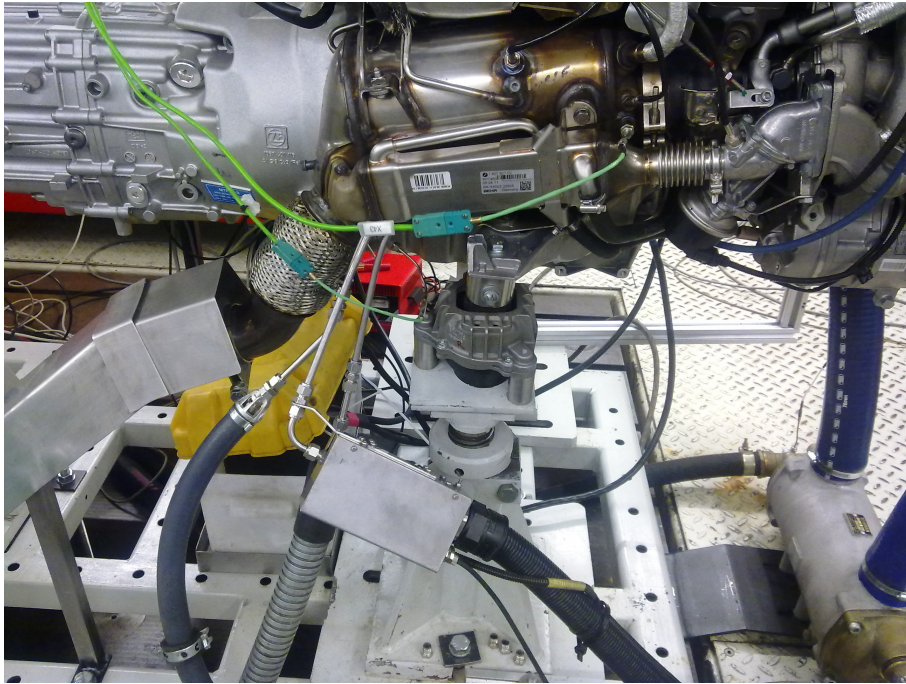
Der detaillierte Aufbau des Katalysators ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Um den Beladungszustand des Partikelfilter erfassen zu können sind vor und nach dem Filter Drucksensoren angebracht. Der Oxidationskatalysator und der Partikelfilter sind in einem gemeinsamen Canning untergebracht. Im Vergleich zum Ottomotor sind die Dieselabgastemperaturen meist niedriger. Um eine schnelle Erwärmung und somit ein kurzes Light-

**Tabelle 3.2:** Katalysatoren mit Zustand und deren Paarungen

	Identifikationsnummer	Zustand	Bezeichnung
Paarung 1	249	degreened	deg.1
	280	gealtert	gealt.1
Paarung 2	289	degreened	deg.2
	288	gealtert	gealt.2
Paarung 3	298	degreened	deg.3
	302	gealtert	gealt.3
Paarung 4	323	degreened	deg.4
	324	gealtert	gealt.4
	260	degreened	deg.5
	284	gealtert	gealt.6



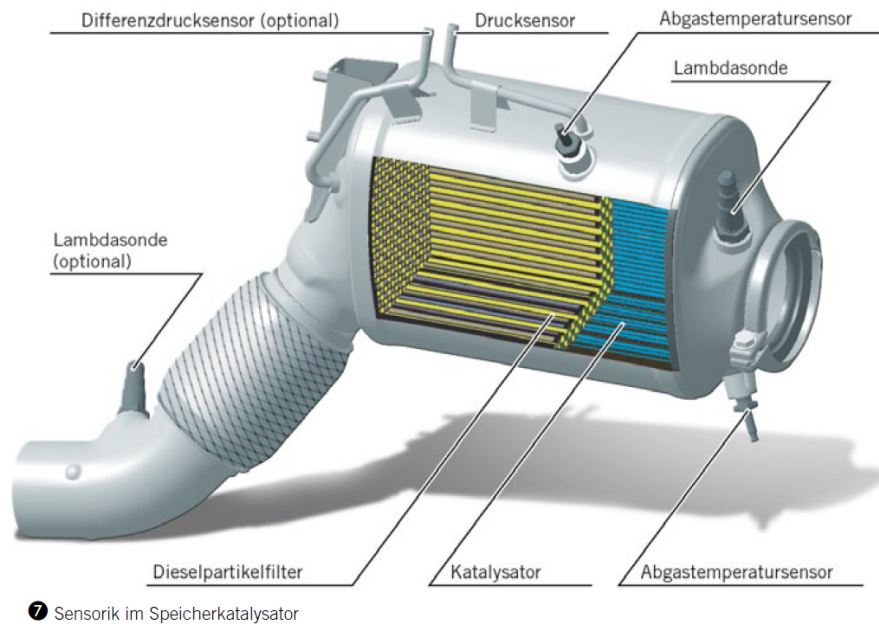
**Abbildung 3.6:** Abgasentnahmestellen an den Katalysatoren



**Abbildung 3.7:** Angeschlossene Emissionsmessgeräte an den Entnahmestellen

Off zu ermöglichen werden die Komponenten konstruktiv nahe am Turbinenausstritt angebracht.

In Abbildung 3.9 ist ein aufgeschnittener Katalysator abgebildet. Im ersten linken Bild ist der Oxidationskatalysator (rechts) und der Dieselpartikelfilter (links) zu sehen. Im mittleren Bild ist die Wabenstruktur des Oxidationskatalysators und im rechten Bild die Struktur des Partikelfilters dargestellt. Die Filter sind in einer Matte eingebettet um unter anderem den unterschiedlichen Wärmedehnungen und Erschütterungen entgegen zu wirken.



**Abbildung 3.8:** Aufbau eines DOC/CSF [20]



**Abbildung 3.9:** Aufgeschnittener Katalysator

### 3.4 Emissionsmessgeräte

Um den Messaufgaben hinsichtlich Emissionsmessung gerecht zu werden wurden 3 verschiedene Emissionsmessgeräte eingesetzt.

Es wurde ein Abgasanalysegerät des Typs AVL CEBII für Messungen der gasförmigen Komponenten  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{HC}$  verwendet. Ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) war für die Emissionsmessung aufgebaut, bei dem die Messungen der Komponenten  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{HC}$  bei der Auswertung verwendet wurden. Zusätzlich wurde noch ein online Ruß-Messgerät zur Messung der Rußkonzentration eingebunden. Die Zubringung vom Motor zu den Abgasanalysatoren erfolgte von den Entnahmestellen über beheizte Leitungen, um Kondensationen zu vermeiden.

### 3.5 Emissionsberechnung

Bei der Auswertung muss auf die Feuchtekorrektur geachtet werden. Bei der AVL CEBII Abgasmessanlage werden die Komponenten  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{O}_2$  nach einer Kondensation von Wasser „trocken“ gemessen. Die gemessenen Werte müssen daher korrigiert werden. Bei der FTIR Messung ist dies nicht erforderlich, da sämtliche Komponenten „feucht“ gemessen werden. Sämtliche Messungen erfolgten mit einer Messfrequenz von 1 Hz um die zeitlichen Verläufe möglichst genau darstellen zu können.

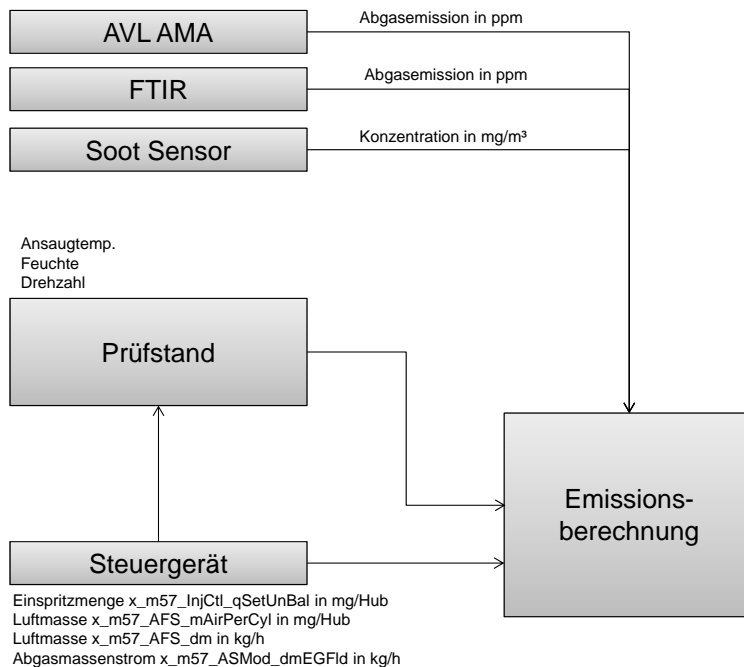


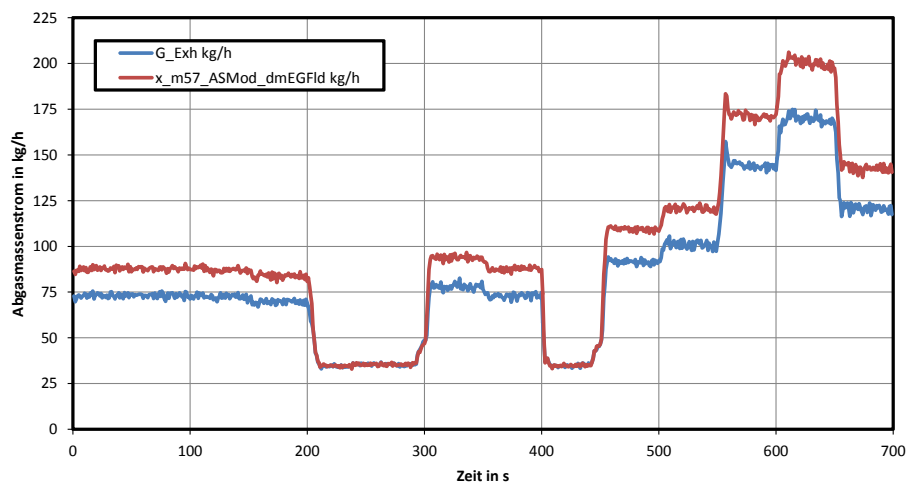
Abbildung 3.10: Schema der Emissionsberechnung

Für die Bewertung der Emissionen wurden sowohl die direkt gemessenen Abgaskonzentrationen der Messgeräte AVL AMA CEBII und des FTIR, als auch die gerechneten Abgasmassenemissionen in g/s oder kg/h verwendet. Das Schema der Emissionsberechnung ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Einspritzmenge und die dafür verwendete Luftmasse werden zusätzlich zum Abgasmassenstrom aus dem Steuergerät über eine CAN Datenleitung ausgelesen. Zusätzlich zu den am Prüfstand gemessenen Werten werden die von den Abgasmessgeräten erfaßten zeitlichen Verläufe in ppm zur Berechnung der gravimetrischen Emissionen verwendet.

$$G_{Exh} = AFS_{dm} + n \cdot EM_{ECU} \cdot 60 \cdot \frac{3}{10^6} \text{ in kg/h} \quad (3.1)$$

Der korrekte Abgasmassenstrom für Messposition 1 und Messposition 2 wurde vom Steuergerät ausgegeben. Für die Berechnung der Emissionen auf Messposition 3 wurde der Abgasmassenstrom aus Luftmasse ( $AFS_{dm}$ ) in kg/h und Einspritzmenge ( $EM_{ECU}$ ) in mg/Hub nach 3.1 verwendet.

In Abbildung 3.11 ist deutlich der Unterschied zwischen dem Abgasmassenstrom vor dem Oxidationskatalysator (Messposition 1) und dem berechnetem Abgasmassenstrom nach dem Partikelfilter (Messposition 3) zu sehen. Die Abgasmassenströme sind hier im Kurztest dargestellt. Die Differenz zwischen den Abgasmassenströmen lässt sich auf das Niederdruck-AGR System (Abbildung 3.6) zurückführen. Deutlich zu sehen sind die beiden Leerlaufphasen in denen das Niederdruck-AGR-System nicht aktiv ist und so der Abgasmassenstrom an allen Messpositionen gleich ist.



**Abbildung 3.11:** Vergleich der Abgasmassenströme



### 3.6 Kurztest

Die Erarbeitung des Kurztests war nicht Teil dieser Diplomarbeit. Für die weiteren folgenden Punkte und für die Vollständigkeit dieser Arbeit wird der Kurztest hier vorgestellt. Dieser teilt sich in eine Konditionierphase am Beginn und 11 weitere Lastpunkte auf.

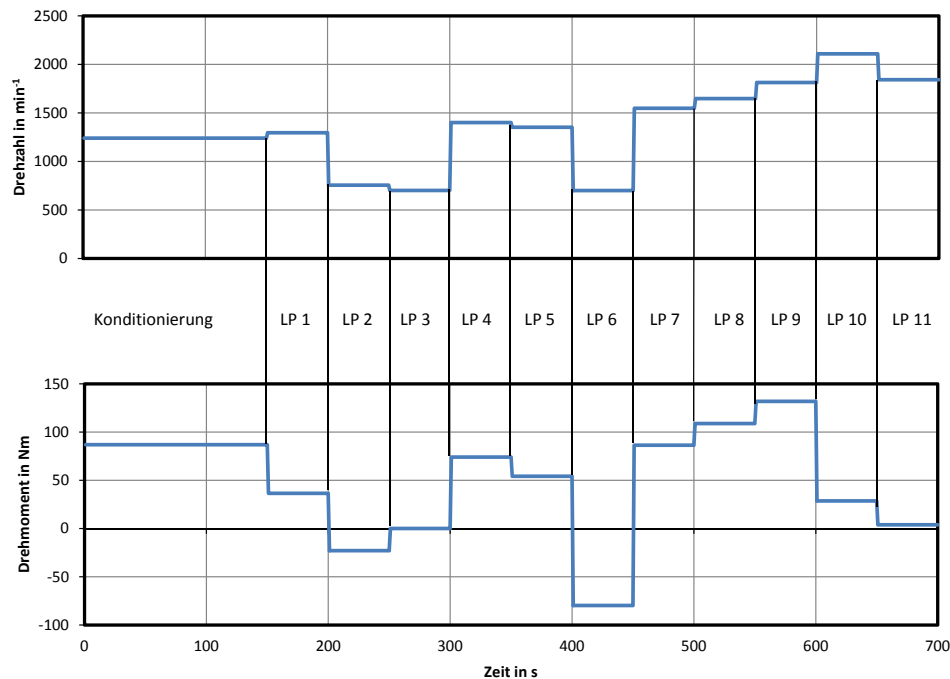
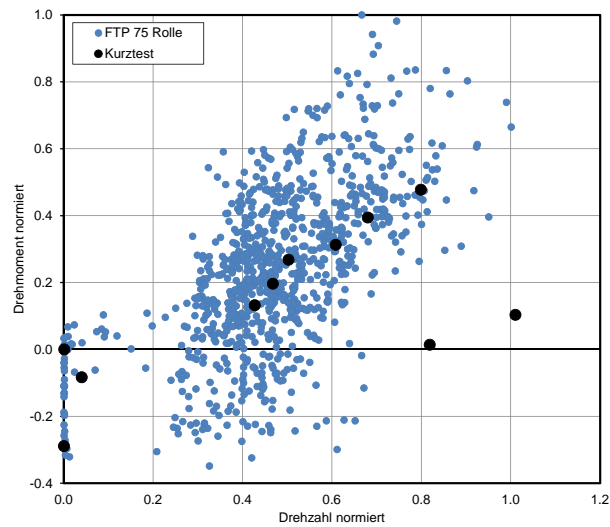


Abbildung 3.12: Vorgegebener Kurztest

Die Drehzahl- und Drehmomentvorgabe ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Lastpunkt zwei und Lastpunkt sechs sind Schubphasen. Lastpunkt drei ist eine Leerlaufphase. Dieser Kurztest wurde so vorgegeben um den FTP-75 Fahrzyklus repräsentativ nachbilden zu können.

n-norm	0.427	0.039	0.000	0.502	0.467	0.000	0.608	0.679	0.798	1.010	0.818	
Md-norm	0.132	-0.083	0.000	0.268	0.196	-0.289	0.313	0.394	0.478	0.104	0.014	
n-min	0.200	0.010	-1.000	0.498	0.435	-1.000	0.566	0.650	0.745	0.900	0.750	
n-max	0.440	0.300	0.205	0.567	0.499	0.205	0.655	0.746	0.900	1.200	0.900	
Md-min	-0.10	-1.00	-0.10	-0.10	-0.10	-1.50	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	
Md-max	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	-0.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Summen	279	53	311	131	169	97	118	87	41	7	39	<b>1332</b>
Anteil	<b>20.9%</b>	<b>4.0%</b>	<b>23.3%</b>	<b>9.8%</b>	<b>12.7%</b>	<b>7.3%</b>	<b>8.9%</b>	<b>6.5%</b>	<b>3.1%</b>	<b>0.5%</b>	<b>2.9%</b>	<b>100%</b>

Tabelle 3.3: Gewichtung der Kurztestpunkte



**Abbildung 3.13:** Kurztestpunkte

In Abbildung 3.13 ist die Verteilung des Kurztestes nach Drehmoment und Drehzahl im FTP-Fahrzyklus dargestellt.

Die prozentualen Anteile der einzelnen Lastpunkte am FTP-75 sind in Tabelle 3.3 ersichtlich. Dabei wurden die Drehzahl und das Drehmoment normiert und für jeden Kurztestpunkt Drehmoment- und Drehzahlgrenzen festgelegt und die FTP-75 Lastpunkte den Kurztestlastpunkten zugeordnet. Diese Gewichtung wurde für die Diplomarbeit vorgegeben.

### 3.7 Messverfahren

Um die Messungen reproduzierbar zu gestalten wurde eine definierte Messroutine festgelegt. Um einen sicheren Motorbetrieb und eine korrekte AGR Rate sicher zu stellen wurde vor jeder Messung der Abgasgegendruck bezogen auf  $p_{40}$  kontrolliert und gegebenenfalls neu eingestellt. Der Abgasgegendruck wurde nach dem Abgasturbolader beziehungsweise vor dem Oxidationskatalysator gemessen und bezieht sich hier nicht auf den Ladungswechselgegendruck. Hierzu wurde ein von BMW zur Verfügung gestelltes Kennfeld benutzt und zwei Kontrollpunkte zur Referenzierung verwendet (Tabelle 3.4).

**Tabelle 3.4:** Kontrollpunkte für den Abgasgegendruck

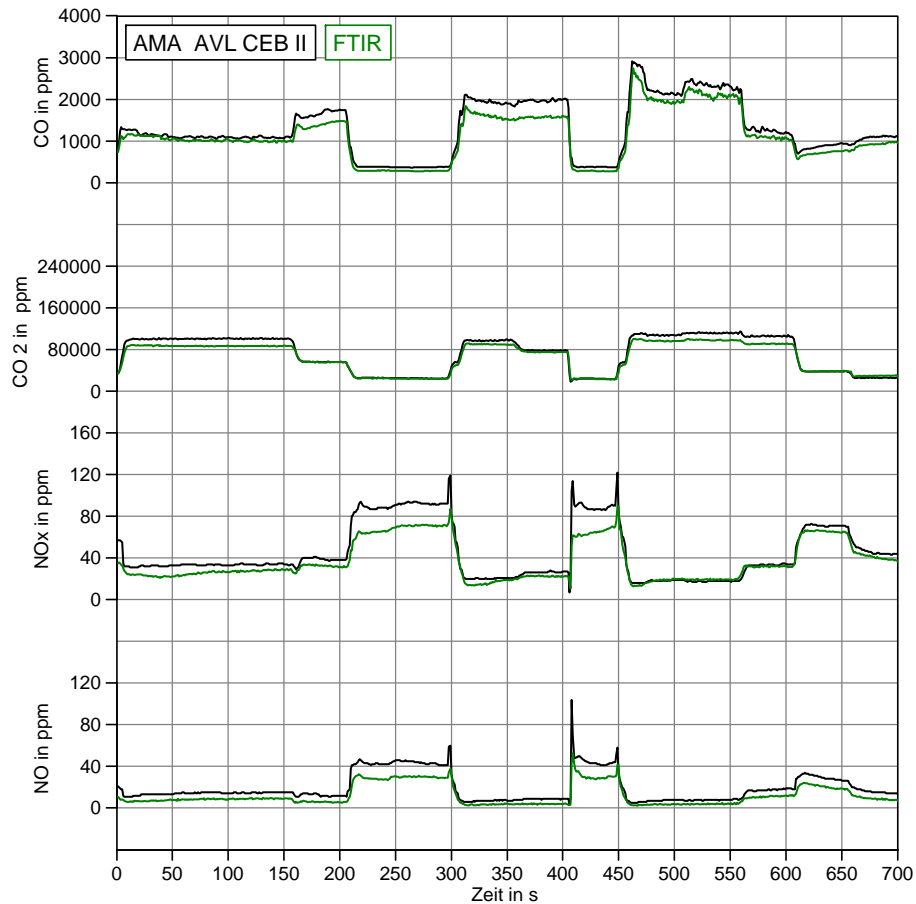
	Drehzahl in $\text{min}^{-1}$	Einspritzmenge in $\text{mg}/\text{Hub}$	Erforderlicher Druck $p_{40}$ in mbar
Punkt 1	2500	32	$\approx 200 - 210$
Punkt 2	1750	16	$\approx 25$

Die Einstellung des Abgasgedrucks erfolgte über eine Abgasgedruckklappe die im Abgassystem des Prüfstandes integriert war. Der erste Punkt war für eine erste Kontrolle des Abgasgedrucks vorgesehen. Über den zweiten Punkt der sich im Mittel in diesem Zyklusschwerpunkt des Kurztestes befindet wurde hier der Abgasgegendruck ein weiteres mal kontrolliert. Es wurde vor jeder Messung der aufgebaute Katalysator regeneriert um für alle DOC/CSF Varianten gleiche Ausgangsmessbedingung zu schaffen. Dies geschah durch den Betrieb an der Vollast mit einer Drehzahl von  $3250 \text{ min}^{-1}$  für eine Dauer von ca. 20 Minuten, um ein Abbrennen des Rußes im Partikelfilter durch die Rußabbrandtemperaturen zu ermöglichen. Im nächsten Schritt erfolgten die Messungen

**Tabelle 3.5:** Messanweisung

	Messgerät	Messposition
1. Messung	AMA	1
	FTIR	3
	Soot	2
2. Messung	AMA	2
	FTIR	1
	Soot	3
3. Messung	AMA	3
	FTIR	2
	Soot	1

nach einer festgelegten Messanweisung, die in Tabelle 3.5 dargestellt ist. Um Nachmessungen zu vermeiden und eine hoher Vergleichbarkeit der Messungen sicher zu stellen wurde diese Messroutine gewählt.

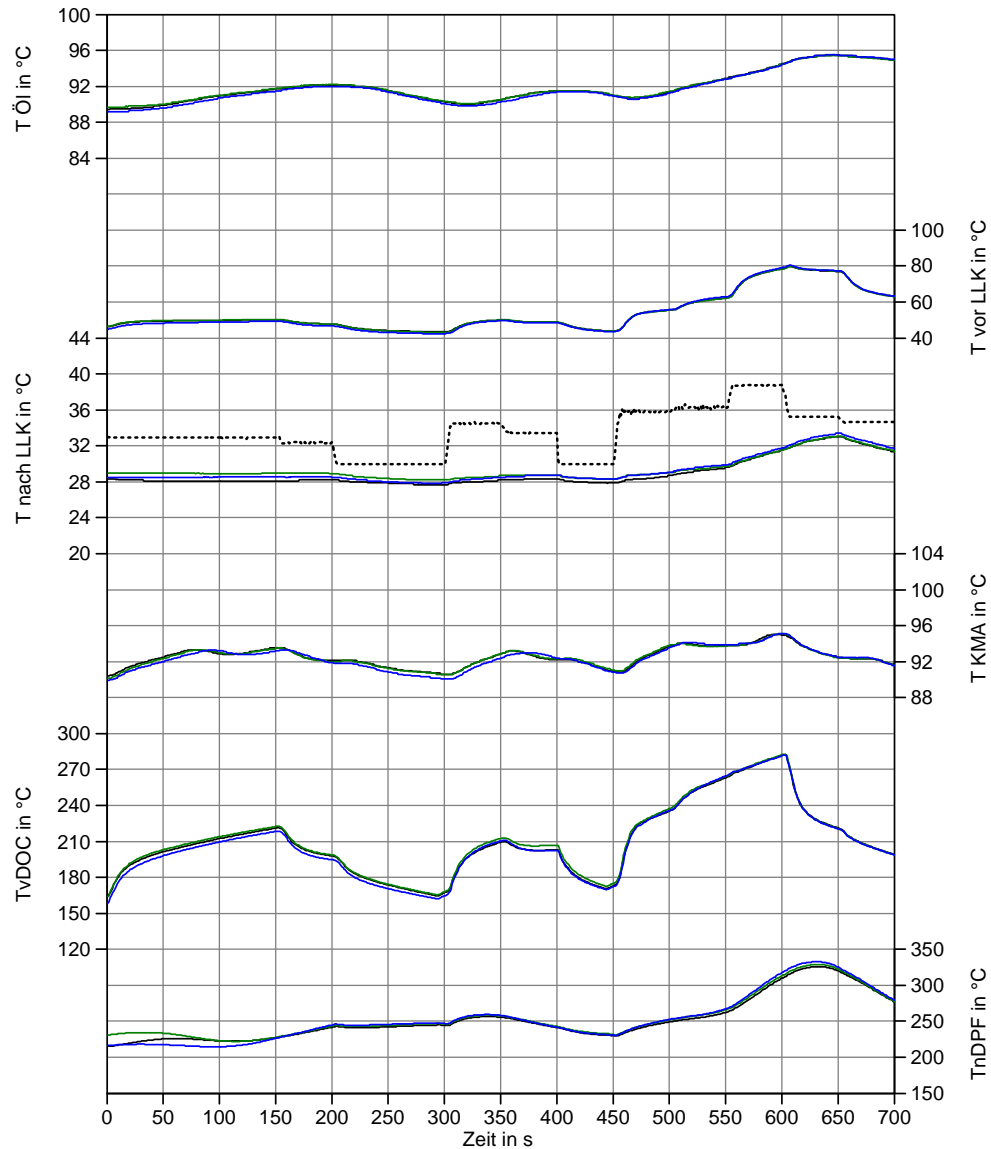


**Abbildung 3.14:** Rohemissionsvergleichsmessung mit AMA und FTIR

Mit Hilfe dieser Messroutinen war es möglich Messungen von verschiedenen Messgeräten auf einer Position zu vergleichen und Messfehler oder Motorbetriebsfehler festzustellen. In Abbildung 3.14 sind besonders Messabweichungen in den Leerlaufphasen zu erkennen. Dargestellt sind Messungen der AVL CEBII in schwarz und Messungen des FTIR in grün. Zu erkennen ist, dass die Messungen des FTIR tendenziell niedrigere Abgaskonzentrationen ergeben als die der AVL CEBII.

Da die Abgasmessungen so exakt wie möglich durchzuführen waren und sich die gemessenen Größen teilweise im niedrigen zweistelligen Bereich bewegten, war eine genaue Konditionierung nötig. Um die Reproduzierbarkeit und die bestmögliche Vergleichbarkeit unter den zu untersuchenden Katalysatorpaarungen sicher zu stellen, wurde auf das Einschwingen sämtlicher Temperaturen geachtet. Besonders wurde auf die Temperatur nach dem Ladeluftkühler geachtet, da sich ein Abweichen bei Testwiederholungen in den

NO<sub>x</sub> Emissionen zeigte und dies eine Messunsicherheit darstellte.



**Abbildung 3.15:** Temperaturverlauf von drei verschiedenen Messungen

Hierbei muss erwähnt werden, dass sich nach einigen Umbauten an der Haustechnik zwar die gemessene Ladelufttemperatur nahe an der vom in der Regelung hinterlegten Kennfeld ausgegebenen Sollwerttemperatur befand, jedoch aufgrund der Temperaturträgheit der Sollwertverlauf nicht erreicht werden konnte (Sollwerttemperatur in Abbildung 3.15 schwarz strichliert). Die Temperaturträgheit wurde durch einen Steller verursacht der in 3 m Entfernung angebracht war. Die Umbauten betrafen die wasserseitige

Haustechnik, um einen Kühlkreis mit einem passend hohem und konstanten Temperaturniveau zu finden. Bei kühleren Kreisläufen war ein starkes plötzliches Abkühlen der Ladeluft die Folge, da der Steller für die Zuleitung in einer größeren Entfernung angebracht war. Es wurden hier alle am Prüfstand möglichen Vorkehrungen getroffen um die Ladeluftkühlung in einem annehmbaren Temperaturfenster zu halten und reproduzierbar zu gestalten.

Durch die Temperaturkonditionierung wurde versucht den Temperaturverlauf vor DOC, also die Rohabgastemperatur nach dem ATL, sowie auch den Temperaturverlauf nach dem Partikelfilter bei jeder Messung gleich zu gestalten. Bei Betrachtung von Abbildung 3.15 ist erkennbar, dass die Temperaturunterschiede in alle drei Messungen gering sind und somit eine hohe Vergleichbarkeit erreicht werden kann.

Das Warmfahren des Motors wurde bei  $2000 \text{ min}^{-1}$  und 2 bar Mitteldruck bis zu einem konstanten Temperaturniveau von Kühl- und Öltemperatur durchgeführt. Für die Reproduzierbarkeit der Abgasmessungen war es des weiteren notwendig einen wiederholbaren Verlauf der Abgastemperatur sicher zu stellen. Um dies zu ermöglichen ist nicht nur eine ausreichende Konditionierung sondern auch ein definierter Startpunkt nötig. Der Startpunkt wurde bei einer Rohabgastemperatur  $T_{40}$  nach dem ATL von  $185 \text{ °C}$  festgelegt. Nach dem Warmlaufen des Motors wurde die Drehzahl auf  $1240 \text{ min}^{-1}$  und ein Drehmoment von 15 Nm reduziert. Das festgelegte Messprogramm wurde dann beim Erreichen einer Rohabgastemperatur von  $185 \text{ °C}$  gestartet.

## 3.8 Kurztest Anpassung

Für die Durchführung der Messungen wurde ein Kurztest vorgegeben. Die Erstellung dieses Kurztestes war nicht Teil dieser Arbeit. Für dessen experimentelle Umsetzung am Motorprüfstand waren jedoch prüfstandsbedingte Anpassungen notwendig.

Die erste Version des Kurztestes war auf dem Prüfstand nicht umsetzbar, da es nicht möglich war den Motor im Schubbetrieb zu betreiben.

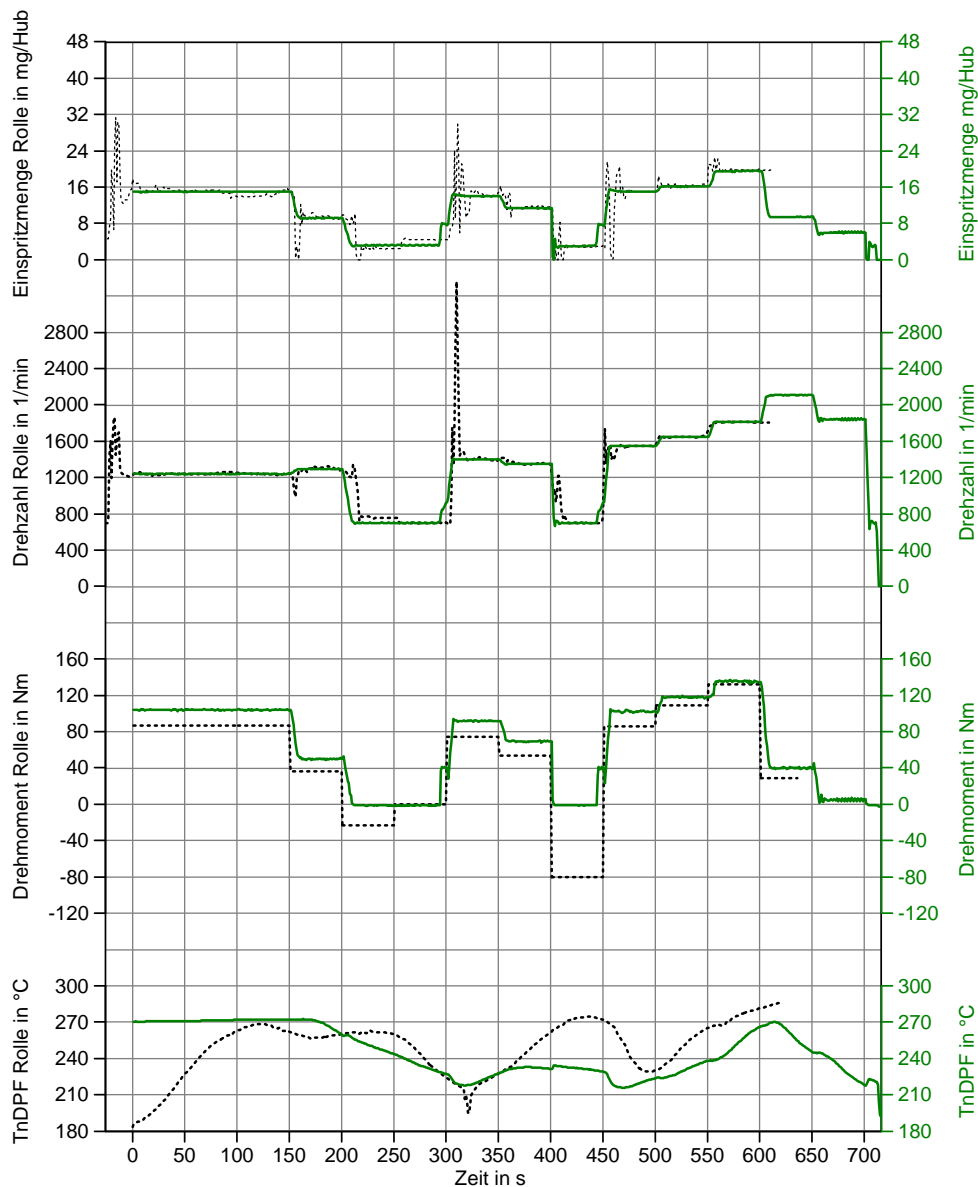


Abbildung 3.16: Angepasster Kurztest für den Prüfstandsbetrieb

Deshalb wurden die geplanten Schubphasen durch Leerlaufphasen ersetzt (Abbildung 3.16).

Des Weiteren war der Drehmomentenverlauf so anzupassen, dass die Einspritzmenge den Verlauf der als Grundlage dienenden Rollenmessung erreicht. Am Motorprüfstand wurde der Kurztest nach Drehzahl und Drehmoment ( $n/M$ ) geregelt. Der Hintergrund für die Wahl dieses Regelungsmodus lag in der Nachbildung eines Rollentestes. Eine Regelung nach Drehzahl und Gaspedalstellung ( $n/\alpha$ ) wäre hier nicht sinnvoll, da damit keine Vergleichbarkeit zwischen den Kurztests und der Rollenmessung gegeben wäre. Wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist weicht der Drehmomentenverlauf des Kurztestes für den Motorprüfstand vom Drehmomentenverlauf des Rollentests ab. Das liegt daran, dass hier das Radmoment der Rollenmessung mit dem Motormoment am Prüfstand verglichen wird. Die Anpassung der Einspritzmenge des Motorprüfstandkurztests auf das Niveau der Rollenmessung zeigt sich somit im Drehmomentenverlauf. Des Weiteren war diese Anpassung notwendig um das Temperaturniveau der Rollenmessung am Motorprüfstand zu erreichen. Da von der Rollenmessung keine Rohabgastemperatur zur Verfügung stand, wurde versucht den Temperaturverlauf nach dem Partikelfilter nachzubilden (Abbildung 3.16). Das Erreichen des selben Temperaturniveaus hat Einfluss auf das Reaktionsverhalten der Abgasemissionen und ist daher für die Vergleichbarkeit ein wichtiger Parameter.

Die Anpassung der Temperaturen stellte sich als schwierig heraus, da bei einer Prüfstandsmessung grundsätzlich andere Randbedingungen vorherrschen als bei einer Messung auf einem Rollenprüfstand. Große Unterschiede ergebend sich alleine durch die Verbauung des Motors und des Abgasstranges im Fahrzeug. Zusätzlich ergeben sich durch die Simulation von Fahrtwind am Rollenprüfstand andere Temperatureinspeicherungen im gesamten Abgassystem. Des Weiteren sind die Drehzahlunregelmäßigkeiten des Rollentest, die auf das physische Betätigen des Gaspedals zurückzuführen sind, gegenüber dem Motorprüfstand deutlich zu sehen.



## 3.9 Beladungsmessung

Zur Untersuchung des Ruß- und Partikelbeladungseinflusses des DPF auf die Abgaszusammensetzung und hierbei speziell auf die NO<sub>2</sub> Bildung wurden an drei Katalysatoren Beladungsmessungen durchgeführt. Hierzu wurde der Motor an einem Betriebspunkt mit hoher Rußemission betrieben (1750 min<sup>-1</sup> und 28 mg/Hub) um den Partikelfilter auf das jeweils ausreichende Maß zu beladen.

Bei der Beladungsmessung wurde für jeden der drei vermessenen Katalysatoren bei jedem Beladungszustand die gesamte Messanweisung wie in Tabelle 3.5 durchgeführt. Zusätzlich zu den Messungen mit leerem Partikelfilter wurde die Messung mit Beladungen des Dieselpartikelfilters von 30%, 60% und 100% realisiert.

Der Beladungszustand wurde hierbei über einen Motorparameter, der vom Steuergerät ausgegeben wird, festgestellt. Dieser Parameter basiert auf der Druckdifferenz, die vom Steuergerät zwischen, vor und nach dem Partikelfilter gemessen wird. Zwischen den einzelnen Messungen war ein teilweises Wiederbeladen des Partikelfilters nötig um bei jeder einzelnen Messung den gewollten Ausgangsbeladungszustand zu erreichen. Dies stellte eine zusätzliche Schwierigkeit für die Einhaltung der Temperatur (Abgastemp., Ladelufttemp.) dar.

Die Beladungsmessung wurde an den Katalysatoren 249 (neuwertig), 289 (neuwertig) und 288 (gealtert) durchgeführt. Mehr Katalysatoren wurden aus zeitlichen Gründen nicht vermessen, da sich die Beladungsmessung als aufwendig herausstellte.

### 3.10 Kennfeld

Um eine Basis für eine später folgende Simulationsrechnung zu generieren wurde am Motorprüfstand zusätzlich ein Kennfeld vermessen. Hierbei wurden Rohabgasmessungen nach dem ATL an Messposition 1 mit der AVL CEBII durchgeführt. FTIR und Ruß-Sensor wurden bei der Kennfeldvermessung nicht verwendet. Am Motorprüfstand war für die Kennfeldvermessung der Katalysator 289 (deg.2) aufgebaut.

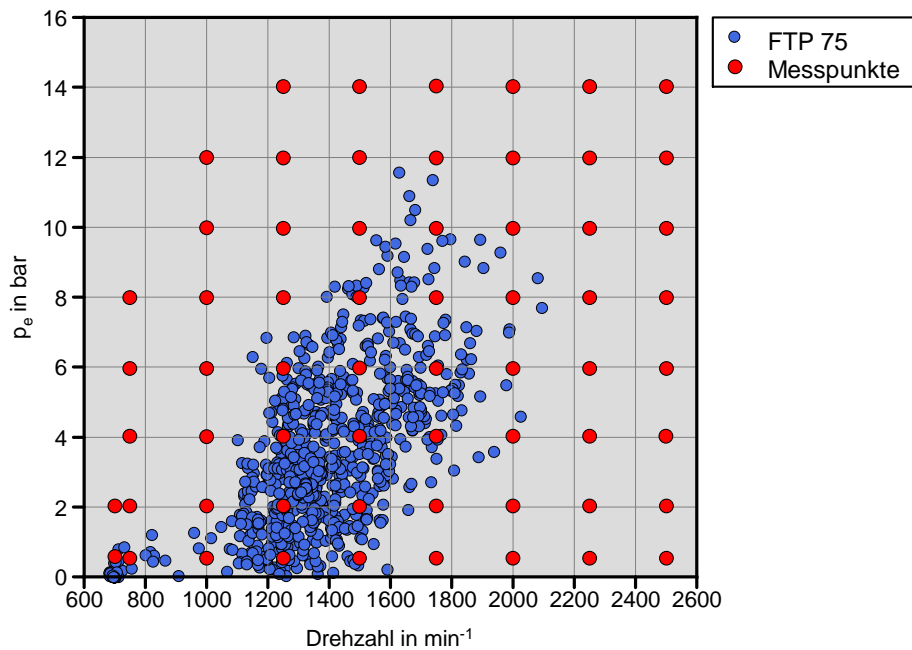
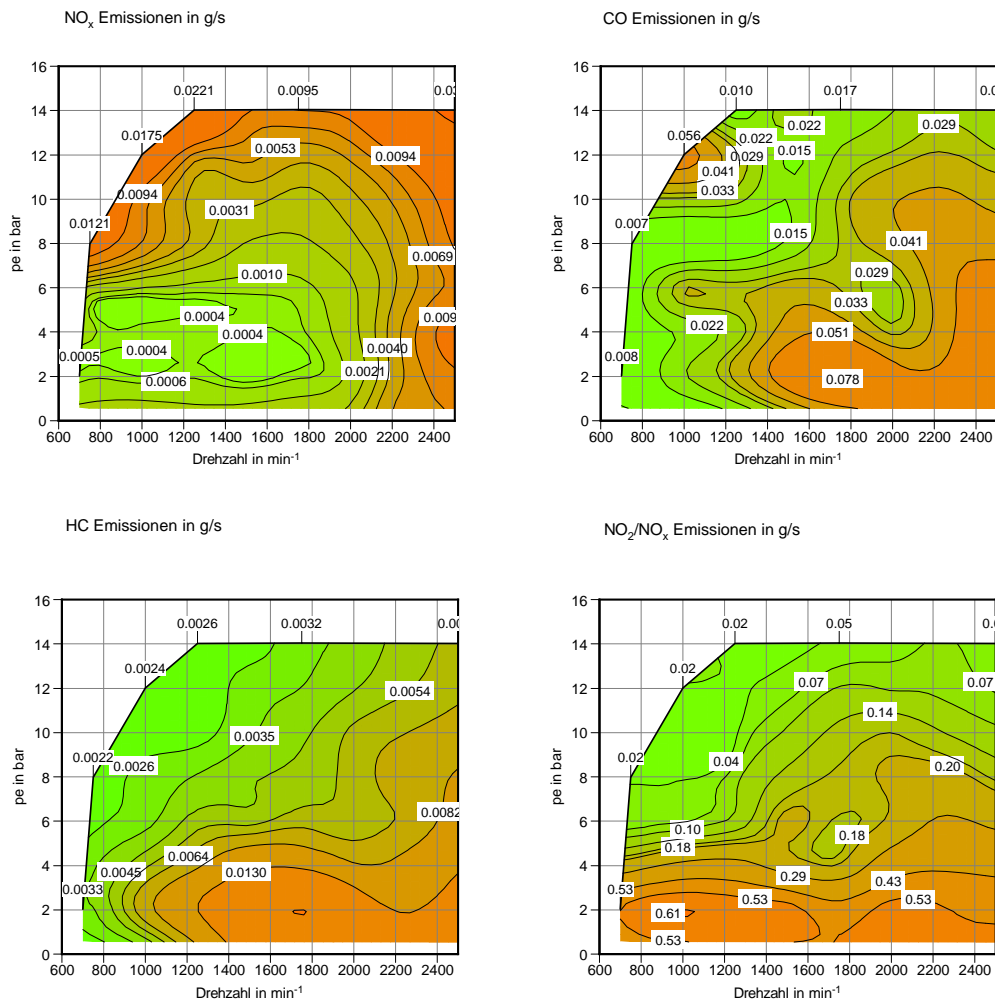


Abbildung 3.17: Vermessene Kennfeldpunkte

Der Umfang des gemessenen Kennfeldes wurde so ausgelegt um die Lastpunkte innerhalb des FTP-75-Fahrzyklus abzudecken und repräsentativ darstellen zu können. Bei Betrachtung von Abbildung 3.17 ist deutlich die Abdeckung der Lastpunkte des FTP-75 durch die Kennfeldmessung dargestellt.

Um eine möglichst genaue Datenbasis für die Simulation bereitstellen zu können wurde das Kennfeld, wie in Abbildung 3.17, in  $250 \text{ min}^{-1}$  Schritten bis zu einer Drehzahl von  $2500 \text{ min}^{-1}$  und in 2 bar Schritten bis zu einem Maximalmitteldruck von 14 bar, gerastert.

Bei der Kennfeldvermessung wurde bei jedem Messpunkt auf das Einschwingen der Rohabgastemperatur und der Temperatur nach dem Partikelfilter geachtet. Somit entstand für die Messung eines Punktes eine Einschwingdauer von 5 - 7 Minuten. Die Messung erfolgte über eine Messdauer von 30 Sekunden und die Ausgabe eines Mittelwertes für jeden Punkt im Kennfeld.



**Abbildung 3.18:** NO<sub>x</sub>, HC, CO, NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Rohemissionen aus der Kennfeldmessung

In den Rohemissionskennfeldern (Abbildung 3.18) ist ein hoher HC bzw. ein hoher CO Anteil bei niedrigeren Lasten zu erkennen. Die HC Emissionen entstehen in Zonen mit Luftüberschuss der bei niedrigen Lasten vorhanden ist. Die NO<sub>x</sub> Emissionen steigen stark mit dem Sinken des Luftverhältnisses und somit mit der Laststeigerung. Des Weiteren ist ein hohes NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis bei niedrigen und ein geringes NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis bei höheren Lasten feststellbar. Bei höherer Lasten herrscht ein niedrigeres Luftverhältnis und somit ein geringerer Anteil von O<sub>2</sub> bei der Verbrennung. Dies führt zu einem Sinken des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis mit steigender Last.

## 4 Auswertung des Kurztestes

In diesem Kapitel wird der auf dem Motorprüfstand aufgenommene Kurztest näher betrachtet. Zur Auswertung wird auf zeitliche Verläufe zurückgegriffen. Des Weiteren werden die Katalysatoren in den verschiedenen Emissionseigenschaften verglichen.

### 4.1 NO<sub>x</sub>-Einspeicherung

Zur genauen Ermittlung des NO<sub>x</sub> Einspeicherungsverhaltens wurde eine Einspeicherungsrate definiert.

Um diese Einspeicherungsrate bestimmen zu können wurden an der Messstelle nach dem ATL (Rohemissionen, Messstelle 1) und der Messstelle nach dem Partikelfilter (Messstelle 3) die Emissionen nach der Abgasnachbehandlung gemessen (4.1). Durch eine zweite Einspeicherungsrate (4.2) konnte festgestellt werden in welchem Ausmaß die Einspeicherungsaktivität auf den Oxidationskatalysator oder den Rußpartikelfilter zurückzuführen ist. Dazu sind die Einspeicherungsraten zwischen Messstelle 1 und 3 mit Messstelle 1 und 2 verglichen worden (Abbildung 4.1).

$$E_{NO_x1} = \frac{NO_{x \text{ pos.1}} - NO_{x \text{ pos.3}}}{NO_{x \text{ pos.1}}} \quad (4.1)$$

$$E_{NO_x2} = \frac{NO_{x \text{ pos.1}} - NO_{x \text{ pos.2}}}{NO_{x \text{ pos.1}}} \quad (4.2)$$

#### 4.1.1 Einspeicherungsverhalten

In Abbildung 4.1 sind die an den Messpositionen gemessenen NO<sub>x</sub> Verläufe abgebildet. Hohe Stickoxid-Emissionen werden vor allem in den Leerlaufphasen gemessen. Diese Hohen Stickoxid-Emissionen entstehen durch Inaktivität des Niederdruck-AGR Systems.

Das zweite Kurvenpaar stellt die Einspeicherungsrate zwischen den einzelnen Messpositionen dar. Es lässt sich nachweisen, dass die Einspeicherungsaktivität gänzlich auf den Oxidationskatalysator zurückzuführen ist, da sich die Einspeicherungsraten an den Messstellen (1-2, 1-3) nur geringfügig unterscheiden. Zu erkennen ist eine deutliche NO<sub>x</sub> Einspeicherung in den Leerlaufphasen des Kurztestes. Nach diesen Leerlaufphasen ist eine deutliche Auslagerung der Stickoxide zu bemerken.

In Abbildung 4.2 wurde der Einfluss der Messdifferenz von AVL CEBII und FTIR auf die Einspeicherungsrate untersucht. Global über den Zyklus betrachtet ist das Niveau

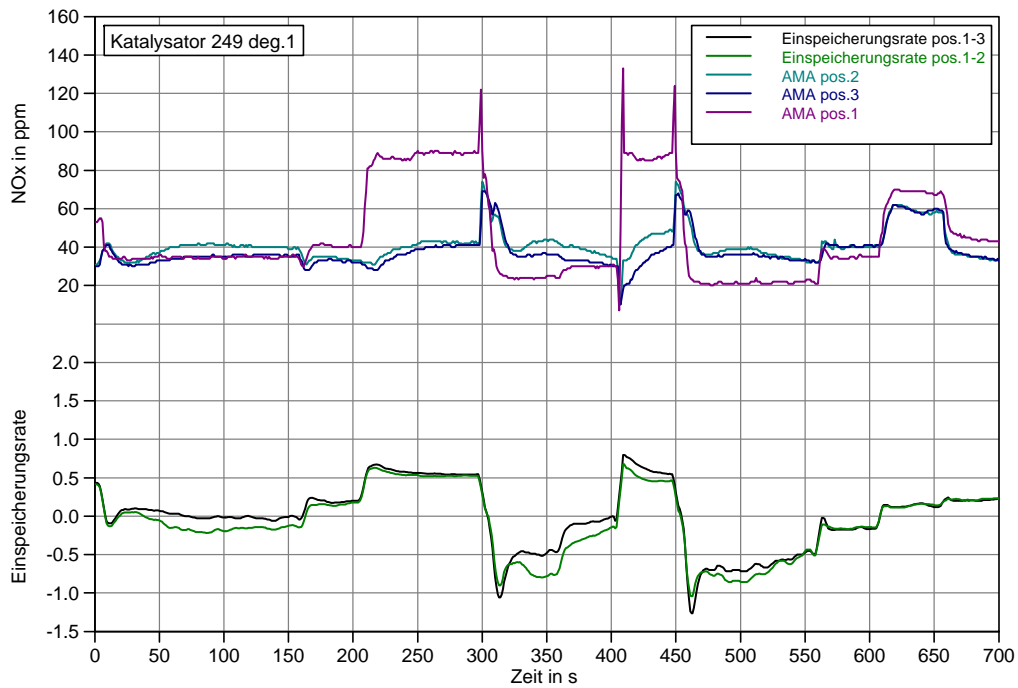


Abbildung 4.1: NO<sub>x</sub>-Einspeicherungsverhalten an einem Katalysator

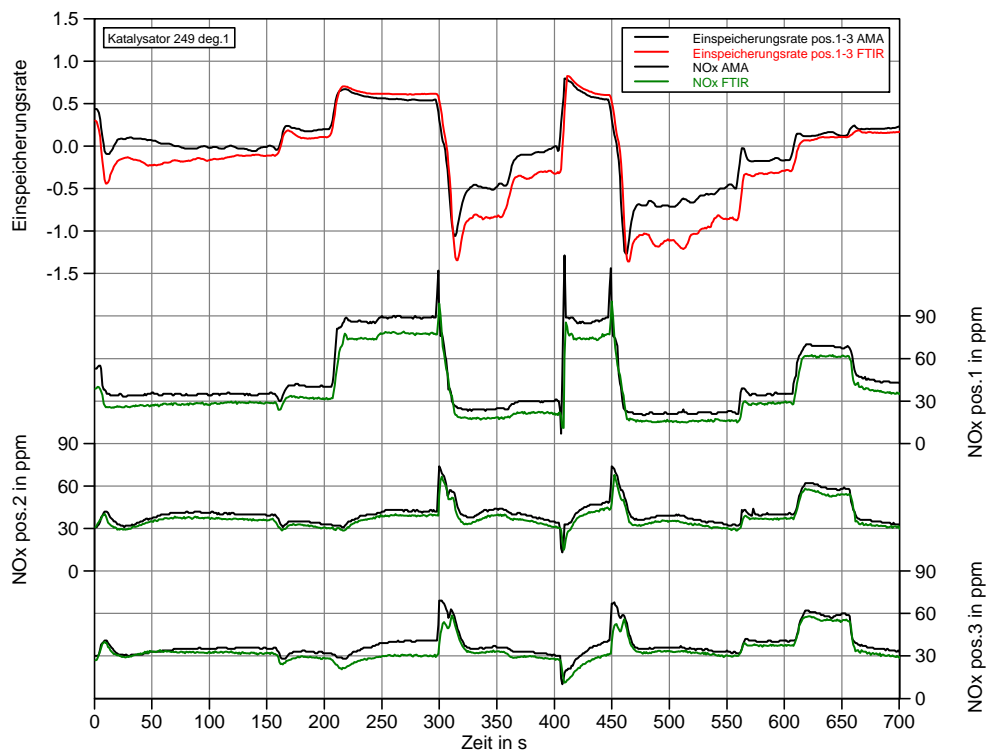
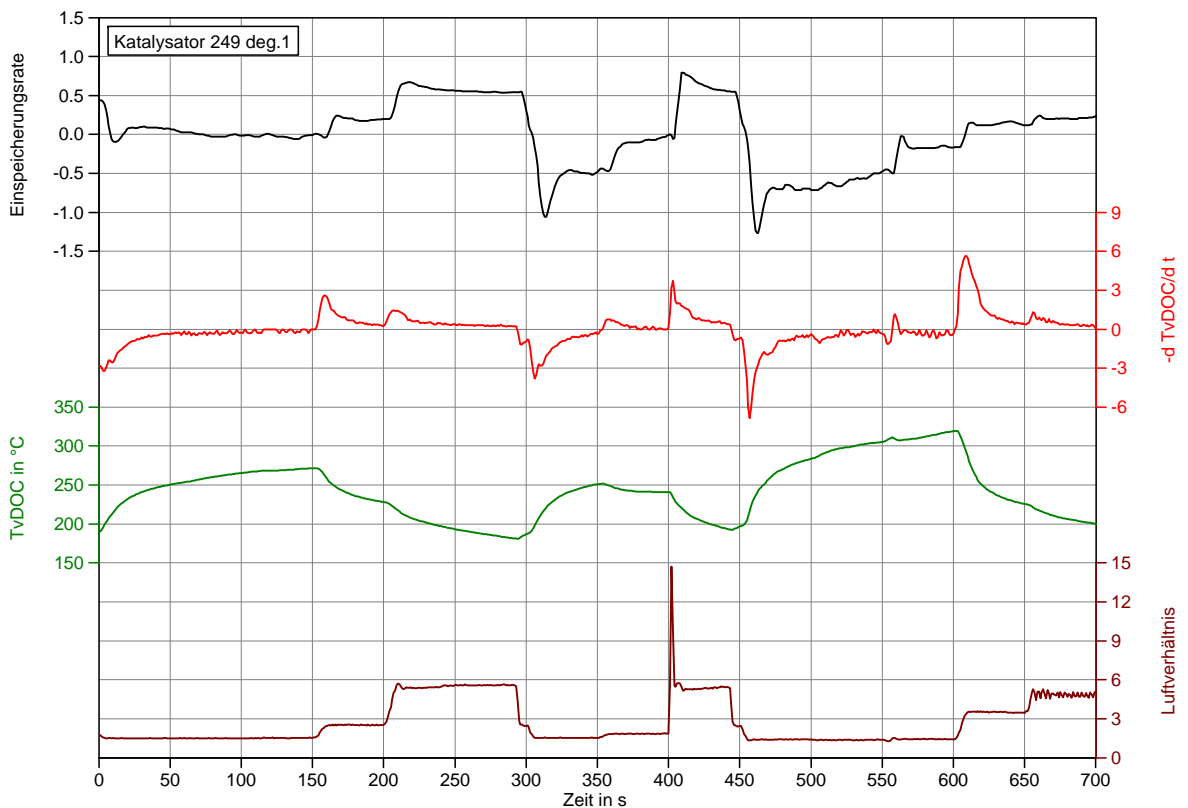


Abbildung 4.2: NO<sub>x</sub>-Einspeicherungsrate gemessen mit AMA CEB II und FTIR

der  $\text{NO}_x$  Emission an den verschiedenen Messpositionen bei der FTIR Messung geringer als die der AVL CEBII Messung. Tendenziell zeigen die Einspeicherungsrate, berechnet aus den Messungen von AMA CEBII und FTIR, das gleiche Einspeicherungsverhalten. Um die Katalysatoren zueinander vergleichen zu können wurde eine einheitliche Auswertemethode, die auf den Messdaten der AMA beruht, gewählt. Des Weiteren werden auch Zertifizierungsmessungen mit der AVL CEBII vorgenommen.

### 4.1.2 Einspeicherungseffekt

Die Einspeicherung in Oxidationskatalysatoren und Speicherkatalysatoren wird unter anderem vom Luftverhältnis und den Temperaturniveaus bestimmt.



**Abbildung 4.3:** Einflussfaktoren auf die  $\text{NO}_x$ -Einspeicherung

Wie bereits erwähnt können aufgrund des mageren Motorbetriebs beim Dieselmotor im Oxidationskatalysator nur HC und CO oxidiert werden. Die Reduktion von Stickoxiden zu Stickstoff bei Sauerstoffüberschuss ist das Ziel der Abgasnachbehandlung, um die hohen Stickoxidemissionen des Dieselmotors zu verringern.

Wie bei einem  $\text{NO}_x$ -Speicherkatalysator kann es bei Oxidationskatalysatoren zu einem Einspeicherungseffekt kommen. Dabei ist es allerdings nötig Materialien im Katalysator

zu verwenden, die die Fähigkeit besitzen Abgase zu adsorbieren.

In erster Linie wird hier Barium und Ceroxid in Speicherkatalysatoren benutzt. In Oxidationskatalysatoren wird oft Ceroxid (CeO<sub>2</sub>) eingesetzt, welches verschiedene Speicherungseigenschaften besitzt. Ceroxid ist ebenfalls Bestandteil von Dreiwegekatalysatoren, die für die Abgasmachbehandlung von Abgasen aus Lambda-geregelten Motoren eingesetzt werden. Bei diesen Katalysatoren wird die Eigenschaft, Sauerstoff bei magerer Zusammensetzung aufzunehmen und bei fetter Phase abzugeben, verwendet um Schwankungen des  $\lambda$ -Wertes auszugleichen. Diese Fähigkeit kann auch bei Diesel- und Magermotoren verwendet werden, diese müssen aber dann zyklisch betrieben werden, wobei sich magere Phasen mit kurzen fetten Phasen abwechseln.

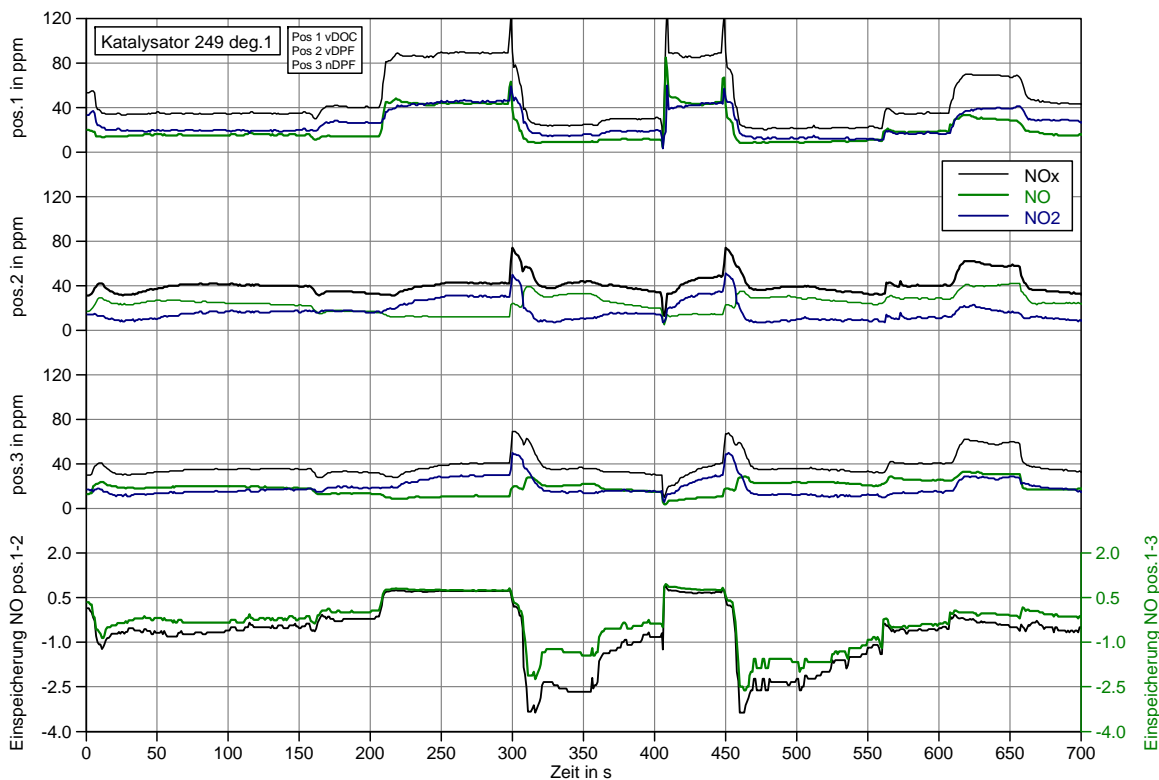


Abbildung 4.4: Haupteinspeicherung durch NO

CeO<sub>2</sub> hat zusätzlich die besondere Eigenschaft bei relativ niedrigen Temperaturen (150-300°C) NO<sub>x</sub> zu speichern. Dies ist besonders bei Dieselabgasen von Nutzen, da diese meist niedrigere Temperaturen aufweisen als Ottoabgase und somit eine gute Aktivität bei diesen Temperaturen möglich ist. Des Weiteren besitzt Ceroxid die Fähigkeit NO in Form von Nitriten und NO<sub>2</sub> in Form von Nitraten zu speichern. Nitrats sind Verbindungen, die aus Adsorption von NO<sub>2</sub> an CeO<sub>2</sub> entstehen und so NO<sub>3</sub> bilden. Als Nitrit sind NO<sub>2</sub> Verbindung, die in einer Vielzahl von Formen vorliegen können, gemeint (lineares Nitrit, einzähniges Nitrit,...).

Nitrate in Katalysatoren, die Ceroxid enthalten, weisen eine geringe thermische Stabilität auf wodurch sich bei weniger mageren Phasen und hohen Temperaturen ein  $\text{NO}_x$  Durchbruch einstellt der größer als die Reduktion ist und somit die Einspeicherung negativ beeinflusst.[3] [22][16]

In Abbildung 4.3 sind die  $\text{NO}_x$ -Einspeicherungsrate, der Temperaturverlauf vor dem DOC, das Luftverhältnis  $\lambda$  und die Ableitung der Temperatur vor dem DOC über die Zeit aufgetragen. Durch die relativ niedrige Abgastemperatur vor dem Oxidationskatalysator (150-350°C) ist hier der Speichervorgang schwieriger zu realisieren als bei höheren Temperaturen, da hier die nötigen Aktivierungsenergien aufgrund der niedrigeren Temperaturen nicht einfach erreicht werden.

Bei Auftreten der mageren Leerlaufphasen ist eine Einspeicherung von Stickoxiden im DOC deutlich nachzuweisen. Bei weniger mageren Phasen und höheren Temperaturen zerfallen die eingespeicherten Nitrate und werden ausgelagert. Des Weiteren scheint nicht nur die Höhe der Temperatur sondern auch der Temperaturgradient einen Einfluss auf die Auslagerungsgeschwindigkeit zu haben. Dies ist deutlich in Abbildung 4.3 durch die Steigungsspitzen der Temperatur und der Einspeicherungsrate zu sehen.

Durch die Betrachtung der Einspeicherung ergibt sich die Fragestellung ob großteils Stickstoffmonoxid oder Stickstoffdioxid eingespeichert wird.

In Abbildung 4.4 wurde die Einspeicherung genauer untersucht. So soll nachgewiesen werden welche Stickoxidkomponente für die Einspeicherung verantwortlich ist. Zu diesem Zweck wurden die  $\text{NO}_x$  und NO Verläufe des Kurztestes an allen drei Messpositionen verglichen. Besonders durch den Oxidationskatalysator ist eine NO-Einspeicherung feststellbar. Während der  $\text{NO}_2$ -Anteil am Stickoxid in der Leerlaufphase konstant bleibt, ist ein Sinken des Stickstoffmonoxids bemerkbar. Diese Einspeicherung findet also in der Leerlaufphase statt. Die Auslagerung des gespeicherten NO folgt in den nachfolgenden Lastzuständen. Die NO Auslagerung ist nach dem DOC besonders ausgeprägt. Dieses Verhalten ist auch durch das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis wie in Abbildung 4.17 und 4.18 dargestellt nachgewiesen. Eine genauere Betrachtung des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses wird in Kapitel 4.4 durchgeführt.



### 4.1.3 Auswirkung der Alterung auf die Einspeicherung

Ein weiteres Thema ist die Auswirkung der Alterung auf verschiedene Vorgänge im Abgasnachbehandlungssystem. In diesem Teil wird speziell auf das Verhalten der NO<sub>x</sub>-Einspeicherung bei gealterten Katalysatoren eingegangen.

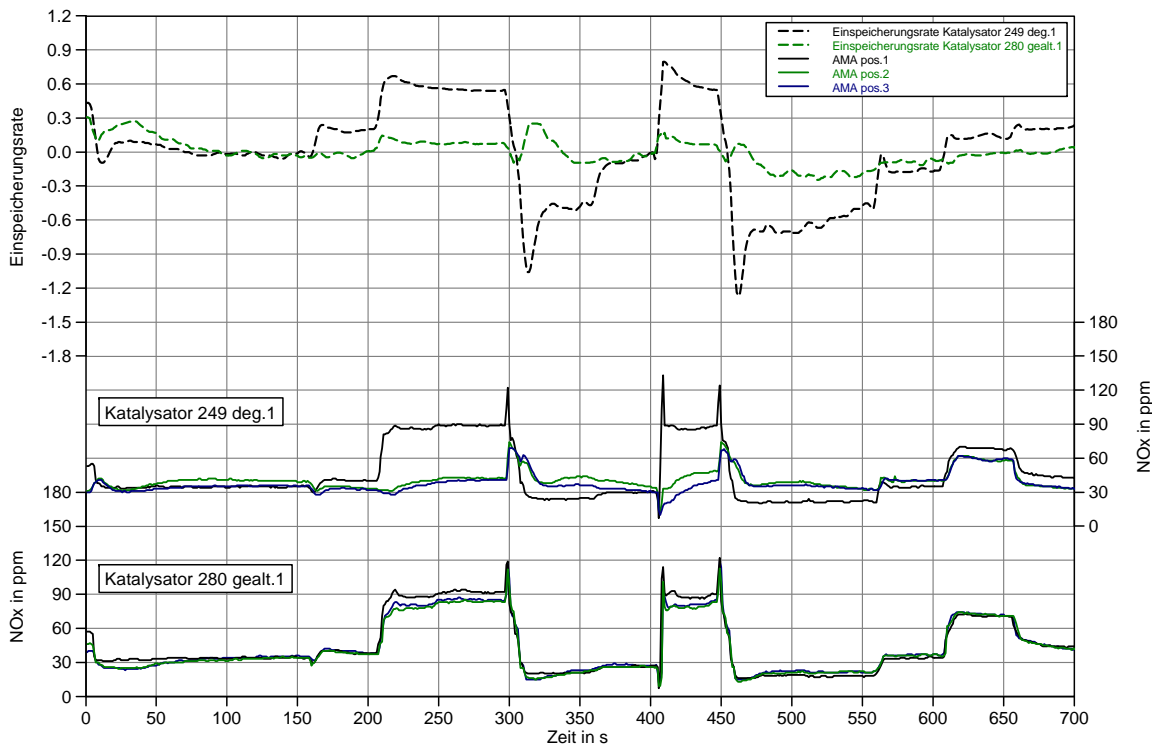


Abbildung 4.5: Auswirkungen der Alterung auf die NO<sub>x</sub>-Einspeicherungsrate

In Abbildung 4.5 wird eine DOC/CSF-Paarung näher betrachtet. Der Katalysator mit der Identifikationsnummer 249 (neuwertig) ist dabei dem Katalysator mit der Nummer 280 (gealtert) gegenübergestellt.

Für die Katalysatoren ist eine große Oberfläche für die Wirksamkeit der Katalyse von großer Bedeutung. Aus diesem Grund werden auf einem Washcoat katalytisch aktive Edelmetalle in geringen Mengen aufgebracht. Durch den Washcoat ergibt sich eine um ca. 10000 mal größere Oberfläche auf der die Reaktionen stattfinden können.[31]

Die Alterungsstabilität wird in erster Linie durch chemische und thermische Effekte beeinträchtigt. Die chemische Alterung wird durch sogenannte Katalysatorgifte wie zum Beispiel Blei, Schwefel und Phosphor verursacht. Diese belegen die Oberfläche und verhindern so die nötige Diffusion der Abgase an der Oberfläche.[18]

Unter hoher thermischer Belastung wie sie bei Abgasnachbehandlungssystemen vorkommt beginnen die Edelmetalle zu sintern. Diese Sinterung führt zu einem Kornwachstum und somit zu einer Verkleinerung der katalytischen Oberfläche. Nicht nur die Edel-

metallkomponenten, die hauptsächlich für die Oxidation von HC und CO verantwortlich sind, sondern auch die für die NO<sub>x</sub> Einspeicherung verantwortlichen CeO<sub>2</sub> Komponenten sind einem Kornwachstum unterworfen. Dieses Kornwachstum setzt ab einer Temperatur von ca.700°C ein und führt zu einer starken Abnahme von NO<sub>x</sub> Einspeicherungen. [3]

Meist übersteigen Dieselabgase vor dem DOC diese Temperatur nicht. Durch Temperaturspitzen bei der Regeneration, die durch Einspritzen von zusätzlichem Kraftstoff oder später Einspritzung realisiert wird, können diese Sinterungen auftreten. [18]

In Abbildung 4.5 ist der deutliche Unterschied in den zeitlichen NO<sub>x</sub>-Verläufen zu sehen. Bei dem gealterten Katalysator sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen an allen drei Messpositionen nahezu gleich. Beim Verlauf der Einspeicherungsrate ist feststellbar, dass durch die Alterung keine nennenswerte Ein- oder Auslagerung von NO<sub>x</sub> mehr stattfindet.

#### 4.1.4 Gesamtübersicht NO<sub>x</sub>-Einspeicherungsverhalten

Hier wird ein Überblick über alle vermessenen Katalysatoren in Bezug auf das Stickoxid-Einspeicherungsverhalten gegeben.

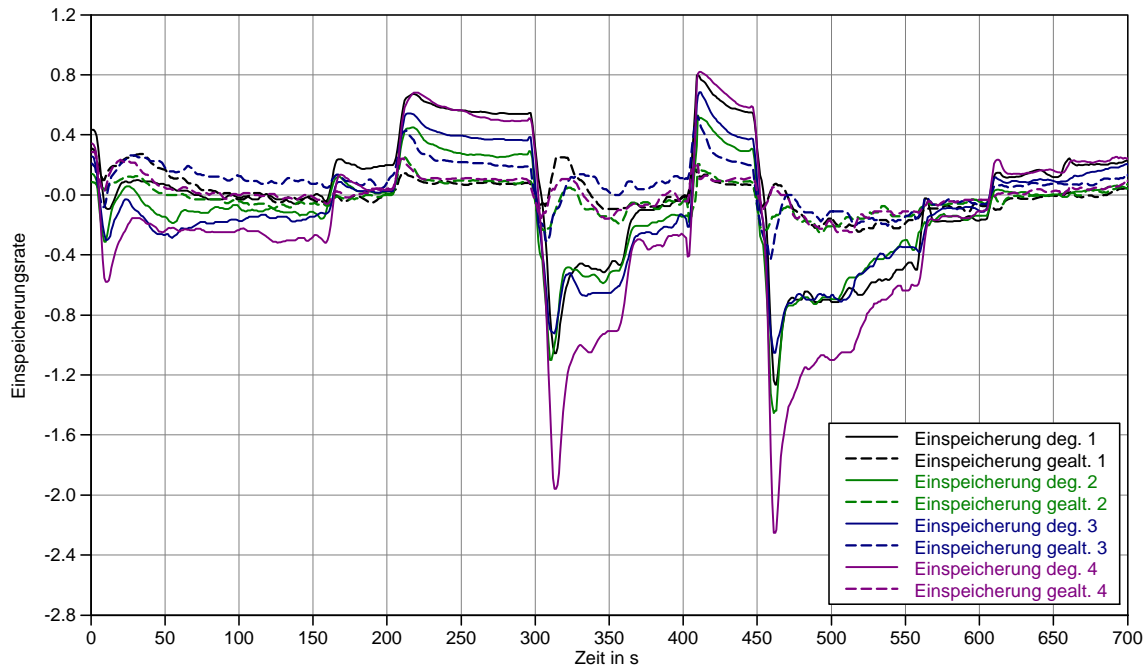


Abbildung 4.6: Vergleich der NO<sub>x</sub>-Einspeicherungsraten

Bei Betrachtung von Abbildung 4.6 ist deutlich der Unterschied im Einspeicherungsverhalten von Stickoxid erkennbar. Während die neuwertigen (degreened) Katalysatoren durchwegs eine hohe Ein- und Auslagerungsaktivität aufweisen ist bei den gealterten Systemen dieses Verhalten nicht mehr oder nur in sehr geringem Ausmaß vorhanden.

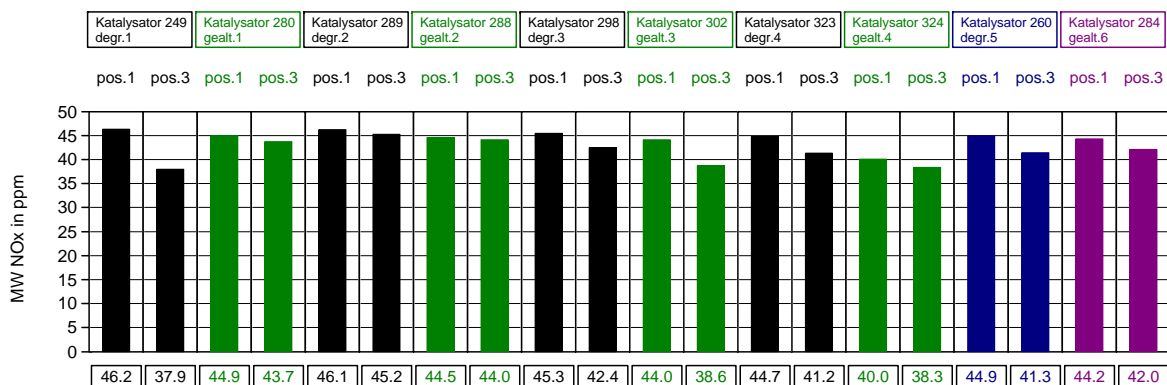


Abbildung 4.7: Vergleich der Mittelwerte NO<sub>x</sub>

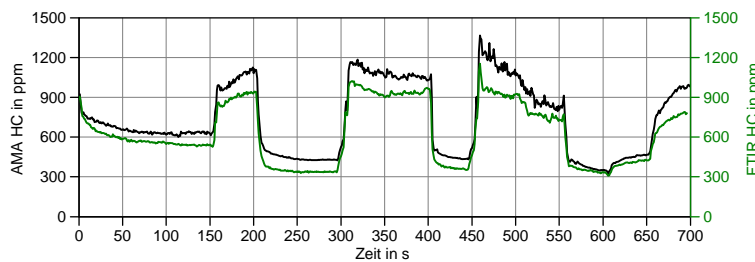
Der Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Einspeicherung wird deutlich geglättet. Ein großer Alterungseinfluss kann bei den Katalysatorpaarungen eins und vier festgestellt werden. Bei der Paarung drei ist der Alterungseinfluss am geringsten.

Um feststellen zu können ob ein bleibender Einspeicherungseffekt über die Zykluszeit vorhanden ist wurde eine weitere Betrachtung herangezogen. Über den zeitlichen Verlauf des Kurztestes wurde der Mittelwert jeweils an Messposition eins und drei gebildet. In Abbildung 4.7 sind jeweils die Paarungen mit den entsprechenden Messpositionen aufgetragen. Generell fällt auf, dass die Unterschiede an den jeweiligen Messpositionen im allgemeinen gering sind. Tendenziell ist jedoch feststellbar, dass neuwertige Katalysatoren über den Messzyklus eine geringfügige Restspeicherung aufweisen, während dies bei den gealterten nicht in diesem Ausmaß der Fall ist.

## 4.2 HC-Konvertierung

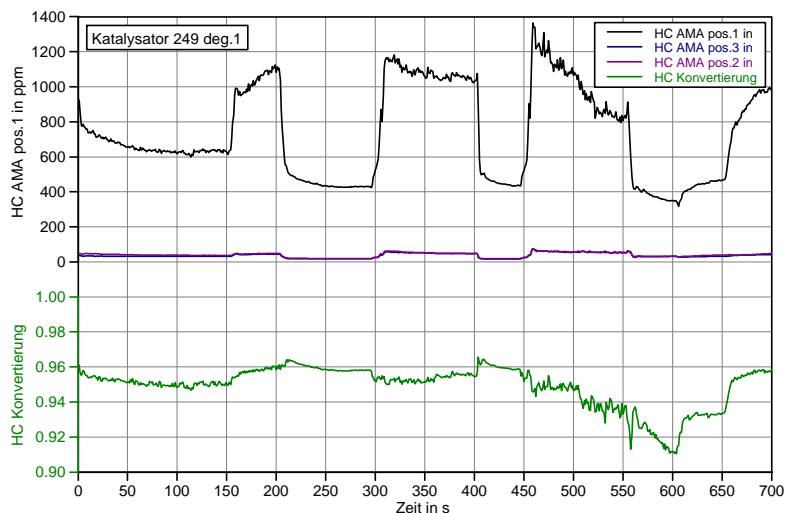
Ein weiteres Thema der vorliegenden Untersuchungen stellt die HC Konvertierung dar. Da kein Einfluss des Partikelfilters auf die HC Konvertierung zu erwarten war, wurde die Konvertierungsrate an den Messpositionen 1 (Rohemissionen) und 3 (nach dem Partikelfilter) bestimmt (4.3).

$$K_{\text{HC}} = \frac{\text{HC}_{\text{pos.1}} - \text{HC}_{\text{pos.3}}}{\text{HC}_{\text{pos.1}}} \quad (4.3)$$



**Abbildung 4.8:** Vergleich der HC Messung von AMA und FTIR

Um eine gleiche Basis zu schaffen und die Vergleichbarkeit unter den verschiedenen Katalysatoren zu gewährleisten wurden auch hier die Messungen der AMA verwendet. Bei den gemessenen Verläufen in Abbildung 4.8 handelt es sich um Rohemissionsmessungen der AVL AMA und des FTIR. Exemplarisch wird hier der Messunterschied zwischen AMA und FTIR Messung dargestellt. Die FTIR Messung bewegt sich hier über den ganzen Zyklus unter der AVL AMA Messung.



**Abbildung 4.9:** HC-Konvertierungsrate

In Abbildung 4.9 sind die HC Emissionen aus Messposition 1, Messposition 2 und Messposition 3 dargestellt. Des weiteren ist der zeitliche Verlauf der HC Konvertierungsrate im Diagramm eingetragen. Bei Betrachtung fällt auf, dass der Messverlauf an Position 2 und Position 3 nahezu identisch ist. Die HC-Konvertierung kann also zum Großteil dem Oxidationskatalysator zugeschrieben werden.

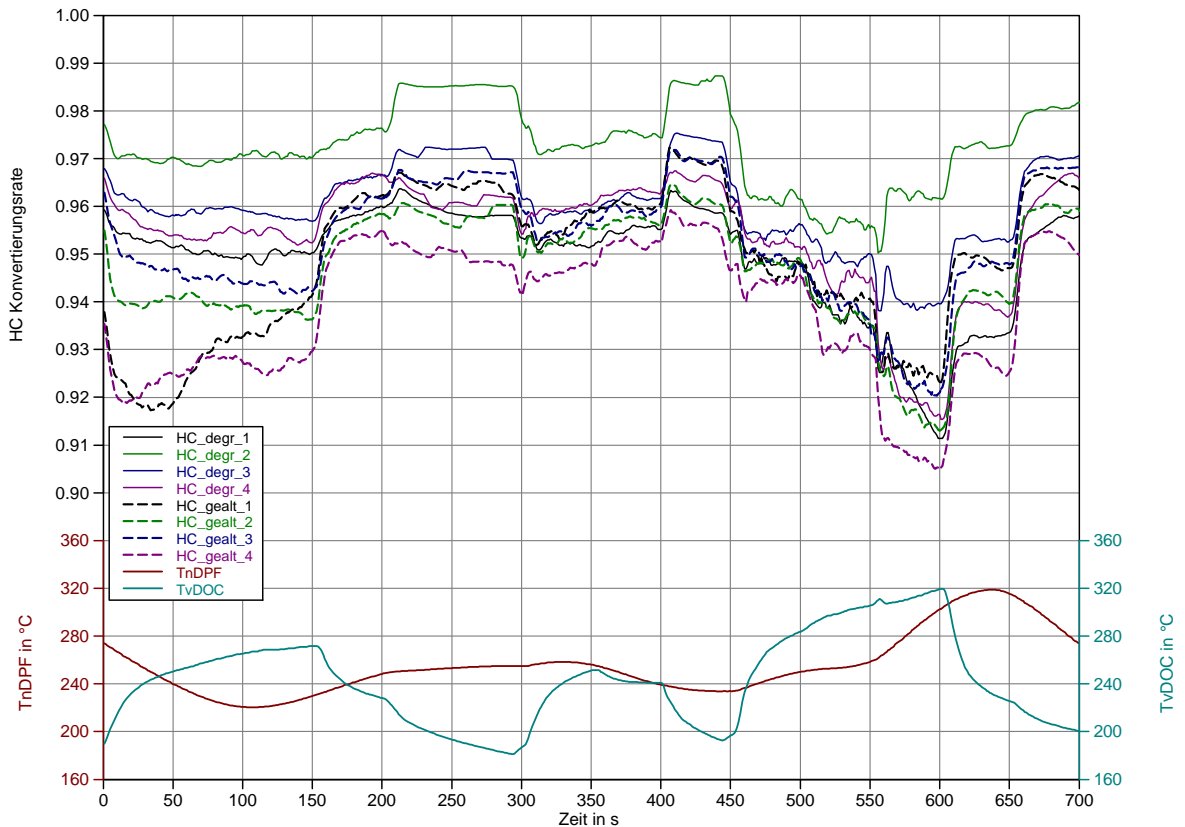


Abbildung 4.10: HC-Konvertierungsrate aller Katalysatoren

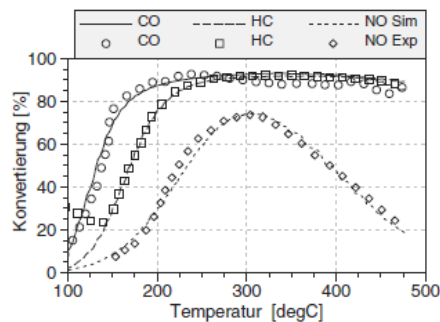
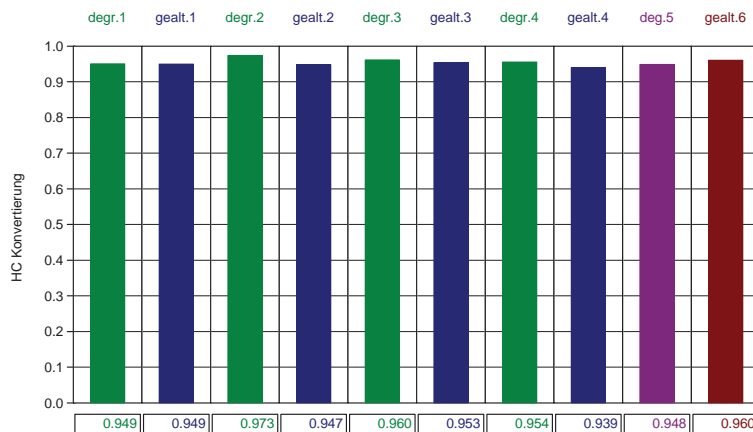


Abbildung 4.11: Light-Off Verhalten von Katalysatoren [16]

Des Weiteren sind in Abbildung 4.10 die zeitlichen Verläufe der HC-Konvertierungsraten aufgetragen. Dabei ist ein Sinken der Konvertierungsrate bei den meisten gealterten Katalysatoren ersichtlich. Die thermische und chemische Alterung zeigt jedoch nur einen geringen Einfluss auf die HC Konvertierung.

Da die Temperaturen vor DOC und nach DPF meist deutlich über 200°C lagen und das gesamte System konditioniert war, ist kein Anspringverhalten, wie es bei einem Kaltstart zu beobachten wäre, vorhanden (Abbildung 4.11). Bei allen Messungen war die Katalysatortemperatur ausreichend hoch um eine maximal mögliche Konvertierung für den jeweiligen Katalysator sicher zu stellen.



**Abbildung 4.12:** HC Konvertierungsrate Mittelwert aller Katalysatoren

Um die Katalysatoren vergleichen zu können wurde der arithmetische Mittelwert über die Zykluszeit der HC Konvertierungsrate gebildet. Wie Abbildung 4.12 zeigt ist eine geringe Verschlechterung der Konvertierungsrate bei den gealterten Katalysatoren bemerkbar. Bei der Paarung Nr.1 konnte jedoch die Konvertierungsrate auf gleichem Niveau nachgewiesen werden.

### 4.3 N<sub>2</sub>O-Bildung

In Abbildung 4.13 ist die N<sub>2</sub>O Messung mit dem FTIR dargestellt. Grundsätzlich sind Oxidationskatalysator und Partikelfilter an der N<sub>2</sub>O Bildung beteiligt. Die Rohemissionen bewegen sich bei allen Katalysatoren auf annähernd gleich niedrigem Niveau.

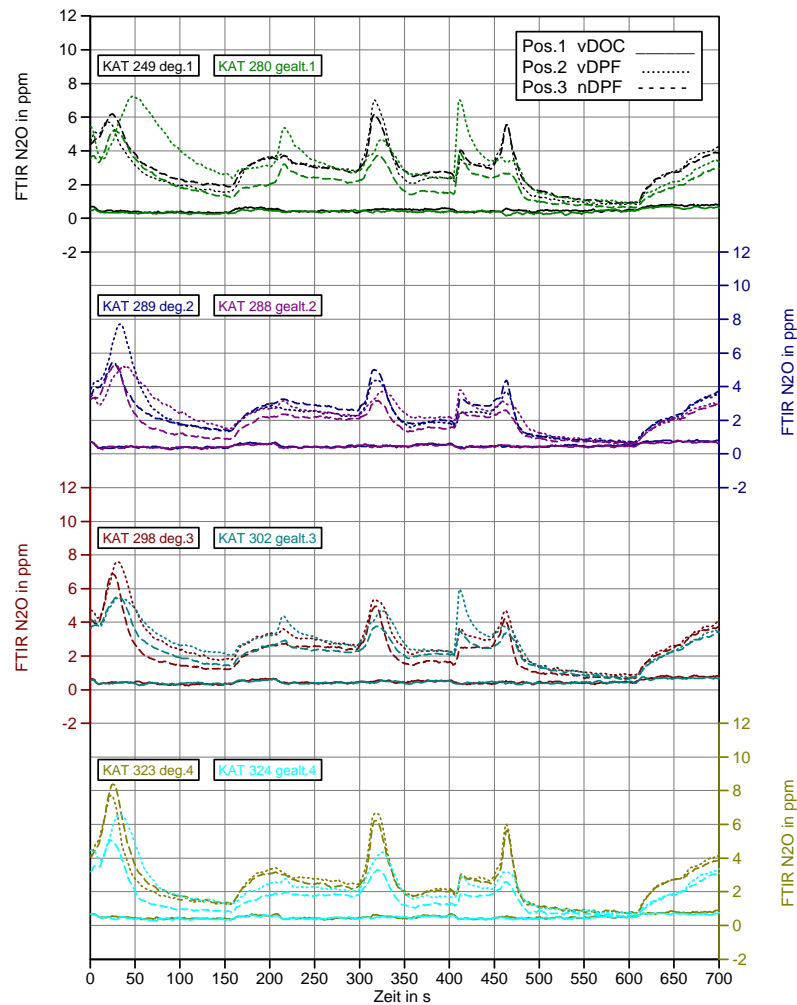
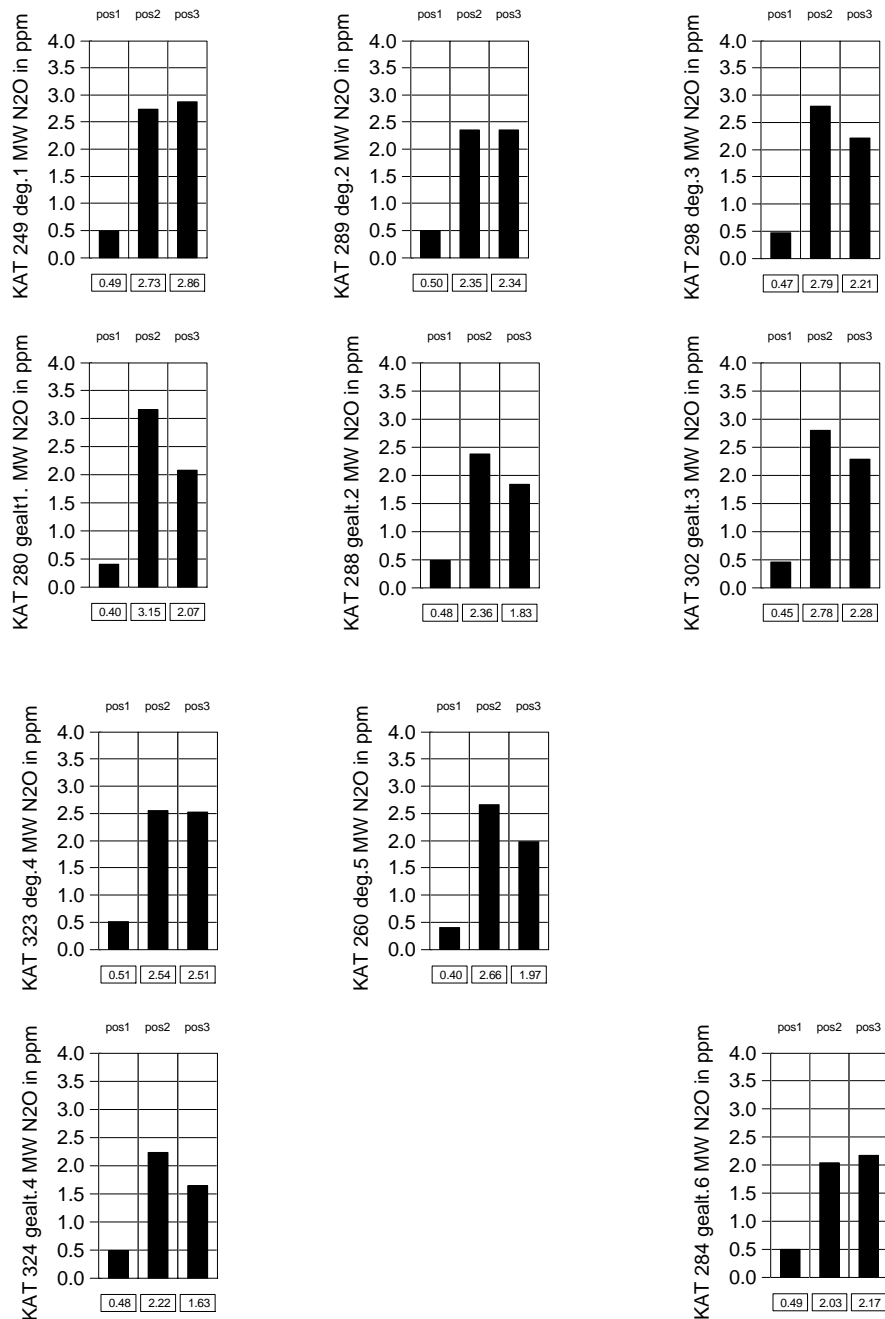


Abbildung 4.13: N<sub>2</sub>O Messung

Wie in Abbildung 4.14 dargestellt ist die N<sub>2</sub>O-Bildung größtenteils durch den Oxidationskatalysator feststellbar. Um feststellen zu können ob dem DOC oder dem DPF eine größere N<sub>2</sub>O-Bildung zuzuschreiben ist, wurde von jeder Messstelle der Mittelwert gebildet. Der Großteil der N<sub>2</sub>O-Bildung konnte somit dem Oxidationskatalysator zugeschrieben werden. Hierbei ist ein geringer oder kein Einfluss des Dieselpartikelfilters bei den neuwertigen Katalysatoren festzustellen. Bei den gealterten Katalysatoren ist ein merkliches Absinken der N<sub>2</sub>O Konzentration, in einem unterschiedlichen Ausmaß,



durch den Partikelfilter erkennbar. Die höchsten N<sub>2</sub>O Konzentrationen werden durch die Paarung 249-280 und 298-302 verursacht. Im allgemeine ist hier anzumerken, dass es sich bei diesen Konzentration von N<sub>2</sub>O um geringe und somit schwer zu erfassende Größenordnungen handelt.

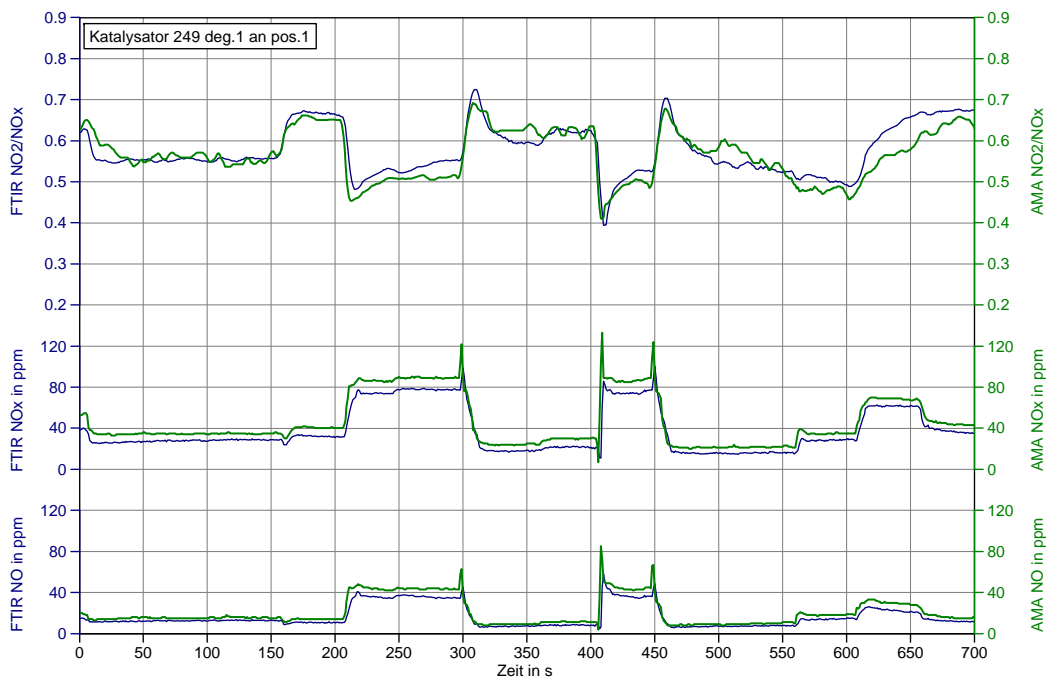
Abbildung 4.14: N<sub>2</sub>O Mittelwert Vergleich

## 4.4 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

Das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis ist ein wichtiger Parameter in der Abgasmachbehandlung von Dieselmotoren.

### 4.4.1 Messdaten

Um genaue Aussagen über das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis treffen zu können ist es nötig die Stickoxide exakt zu messen. Hierbei standen die Messdaten der AMA CEBII und des FTIR zur Verfügung. Wie bereits erwähnt weisen die Messergebnisse des FTIR immer einen etwas geringeren Wert als die der AMA auf.



**Abbildung 4.15:** NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis Vergleich von AMA CEBII und FTIR

In Abbildung 4.15 sind die Stickoxid-Messwerte von AMA CEBII und FTIR aufgetragen. Obwohl hier Unterschiede vorhanden sind weist das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis den nahezu identischen zeitlichen Verlauf auf. Bei den nachfolgenden Betrachtungen sind die Messdaten der AMA verwendet worden. In erster Linie wird versucht das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis über die Oxidationskatalysatoren und Dieselpartikelfilter zu erhöhen. In Hinblick auf ein SCR-System wäre ein konstantes NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis von 50 % wünschenswert, um die maximale Effektivität für die NO<sub>x</sub>-Reduktion zu erreichen.

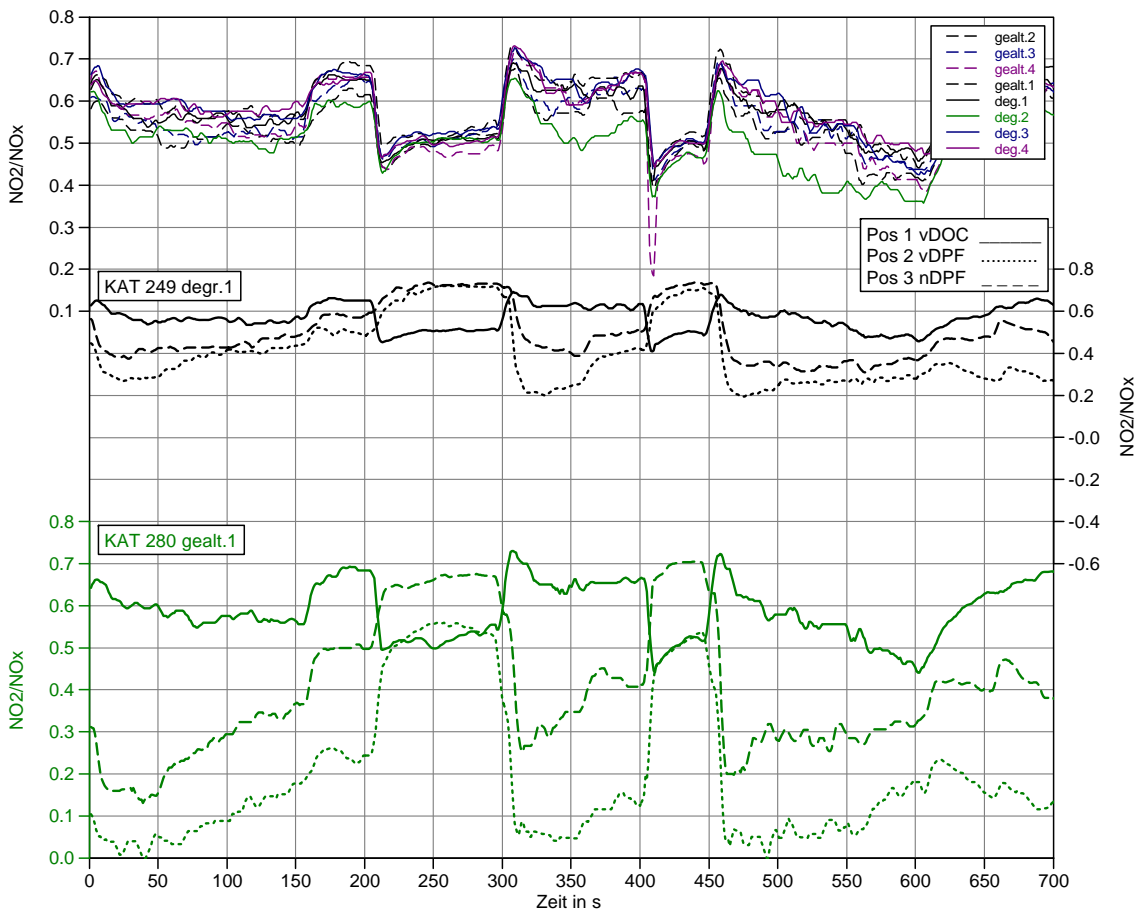
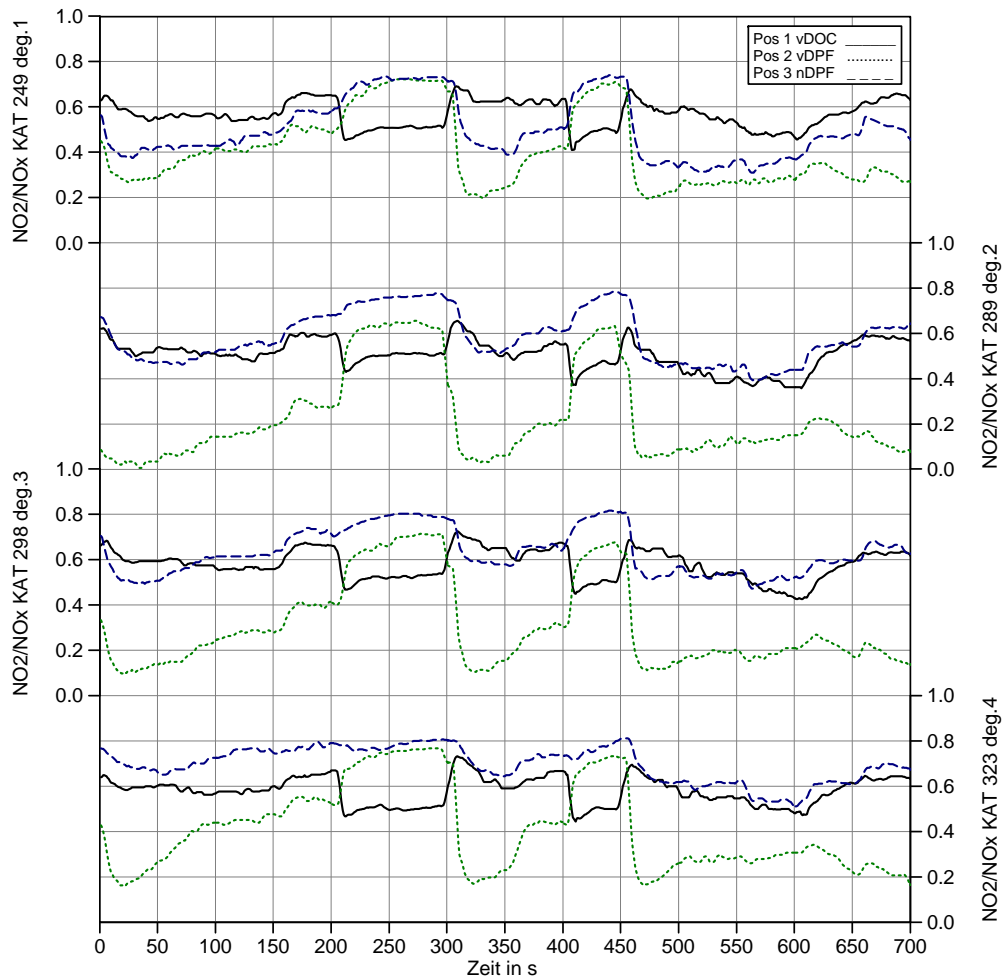


Abbildung 4.16: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis Übersicht

Bei Betrachtung von Abbildung 4.16 ist erkennbar, dass sich die NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse aller Katalysatoren an der Messposition 1, also vor DOC, über den gesamten Kurztest nur geringfügig abweichen. Dies weist auf einen reproduzierbaren Motorbetrieb und eine exakte Temperaturkonditionierung hin. Des Weiteren wurde in Hinblick auf das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis jeder Katalysator einzeln betrachtet. Für diese Untersuchung wurden die zeitlichen Verläufe an allen drei Messpositionen zu Hilfe genommen. Dabei ist in erster Linie ersichtlich, dass das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis über den Oxidationskatalysator sinkt. Dieses Sinken des Verhältnisses ist sowohl bei den neuwertigen als auch bei den gealterten Katalysatoren zu beobachten. Dieses sinken des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses dürfte darauf zurückzuführen sein, dass in niedrigen Lastpunkten wie sie im Kurztest vorkommen hohe HC und CO Emissionen verursacht werden. Diese HC und CO Emissionen verringern im Oxidationskatalysator den Sauerstoff durch ihre Oxidation. Aus Vorprojekten ist bekannt, dass hierfür sogar NO<sub>2</sub>-Verbindungen aufgebrochen werden und so das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis sinkt.

#### 4.4.2 Alterungseinfluss auf das $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis

Im folgenden wird der Alterungseinfluss auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis untersucht.



**Abbildung 4.17:**  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis der neuwertigen Katalysatoren

In Abbildung 4.17 sind die Verläufe der neuwertigen Katalysatoren dargestellt. Das Sinken des Verhältnisses ist in unterschiedlicher Stärke bei allen vermessenen Katalysatoren zu beobachten. Während Katalysator 249 ein geringes Absinken des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis verursacht ist dies bei Katalysator 289 stärker ausgeprägt. Nach passieren des Dieselpartikelfilters steigt das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis auf das Niveau vor dem Oxidationskatalysator an, was auf eine katalytische Beschichtung des Partikelfilters schließen lässt, welche  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  oxidiert.

Bei den gealterten Katalysatoren befindet sich das Ausgangsverhältnis zu Beginn des Zyklus auf gleicher Höhe wie bei den neuwertigen Katalysatoren (Abbildung 4.16). In Abbildung 4.18 sind die gealterten Katalysatoren aufgetragen. Im Unterschied zu den neuwertigen sinkt hier das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis nach dem DOC stärker ab. Der Anstieg des Verhältnisses nach dem DPF fällt bei den gealterten niedriger aus als bei den neuwertigen. Besonders ist dies bei den Katalysatoren 280 und 324 zu beobachten.

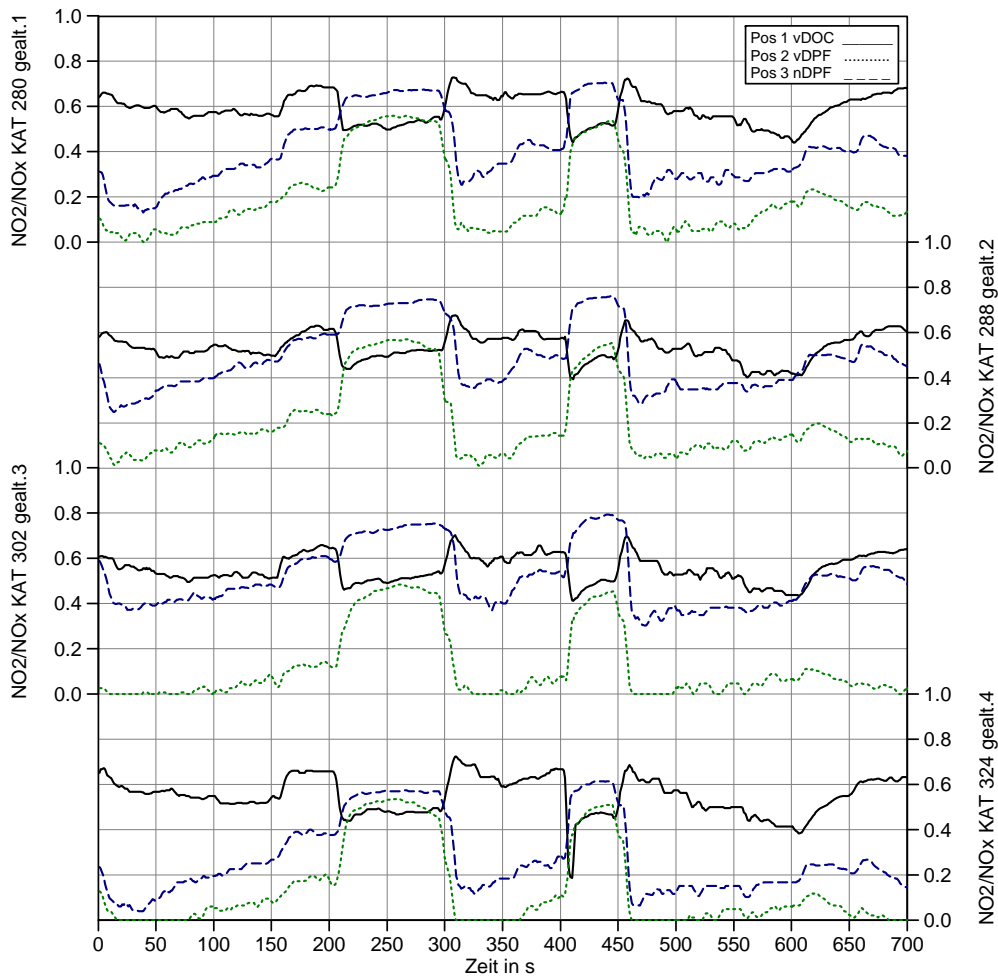
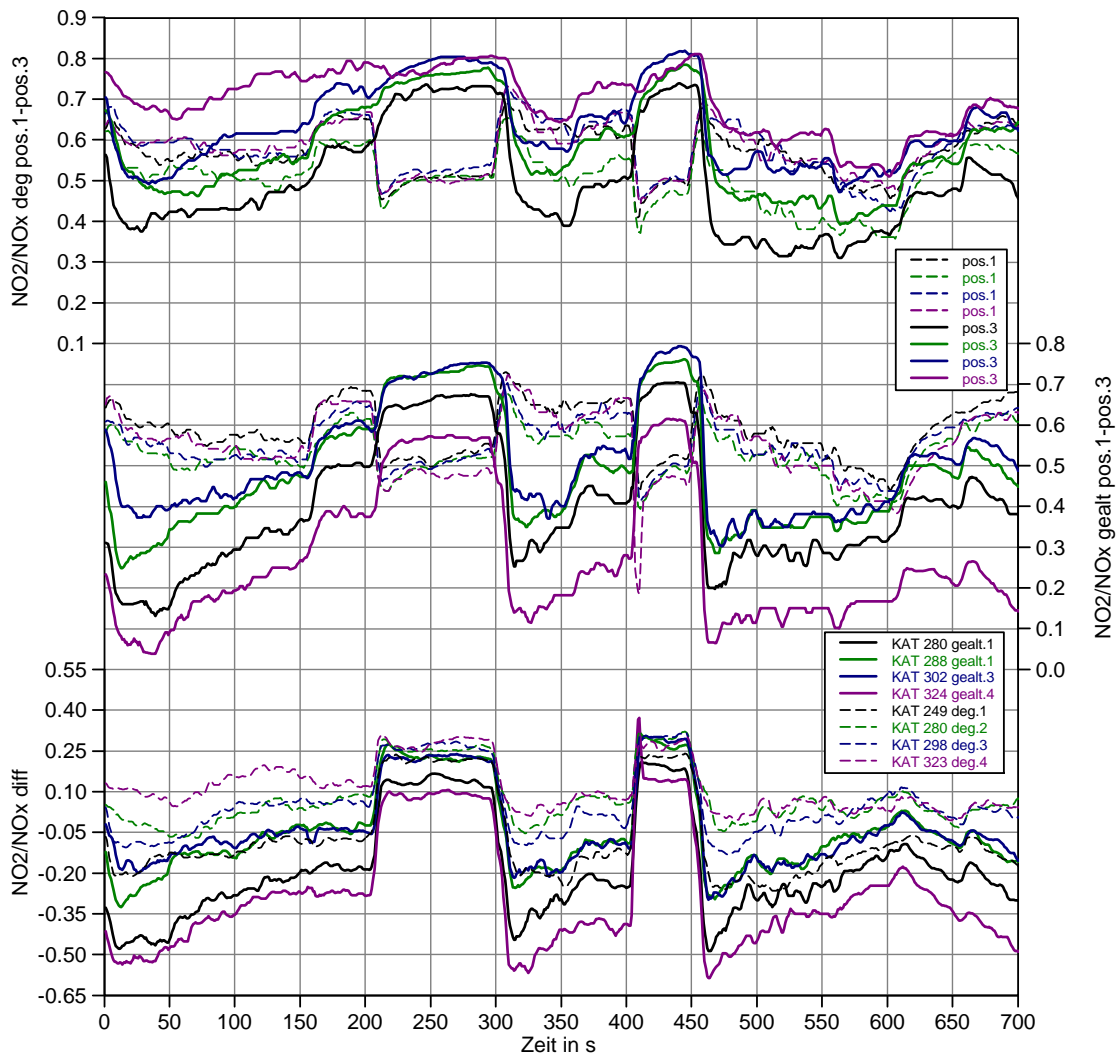


Abbildung 4.18: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis der gealterten Katalysatoren



**Abbildung 4.19:** Vergleich der Katalysatoren ( $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis)

In Abbildung 4.19 ist der Unterschied zwischen neuwertigen und gealterten Katalysatoren deutlich zu sehen. In dieser Grafik ist der Einfluss des DOC und DPF, also zwischen Messposition eins und drei dargestellt, um einen Überblick über das gesamte Abgasnachbehandlungssystem zu erhalten. Des Weiteren ist eine Betrachtung der  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Differenz nach Formel 4.4 durchgeführt worden.

$$\text{Diff}_{\text{NO}_2/\text{NO}_x} = \text{NO}_2/\text{NO}_{x\text{pos.3}} - \text{NO}_2/\text{NO}_{x\text{pos.1}} \quad (4.4)$$

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich Alterungseffekte stark auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis auswirken. Im Allgemeinen ist ein Sinken des Verhältnisses erkennbar, was auch deutlich in der Differenz in Abbildung 4.19 zu sehen ist.

## 4.5 Beladungsuntersuchung

Die Beladungsmessung wurde an drei Katalysatoren durchgeführt. Zwei neuwertige Katalysatoren sind in Abbildung 4.20 und 4.21 dargestellt. Der gealterte Katalysator wird in Abbildung 4.22 behandelt. Um hier eine Aussage treffen zu können, müssen bei jeder Auswertung die Rohemissionen vor dem Oxidationskatalysator berücksichtigt werden. Dazu ist in jeder Abbildung der zeitliche Verlauf der  $\text{NO}_x$ -Rohemissionen für jeden Beladungszustand eingetragen.

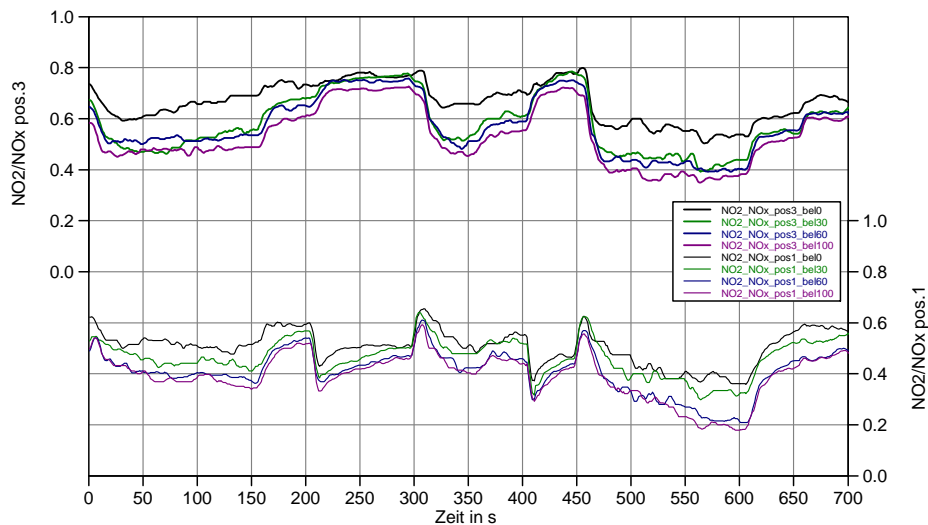


Abbildung 4.20: Beladungseinfluss auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis von KAT 289

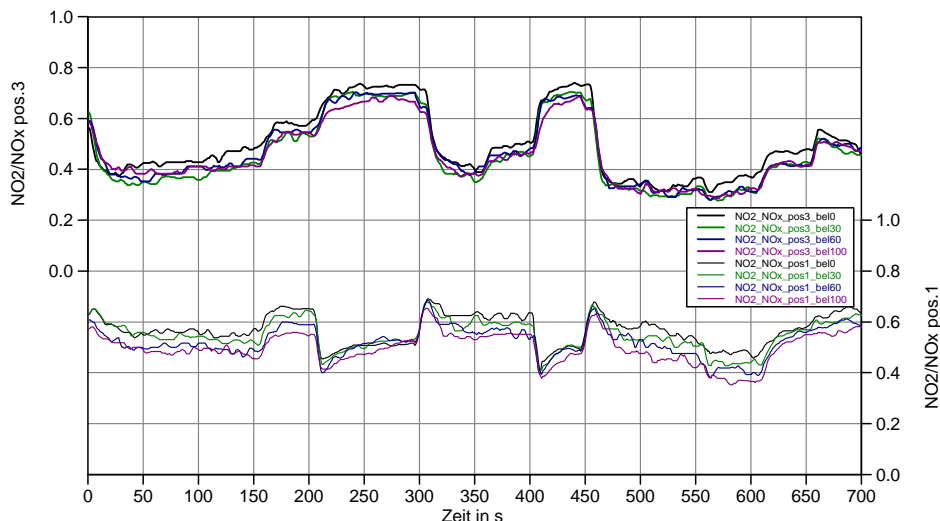
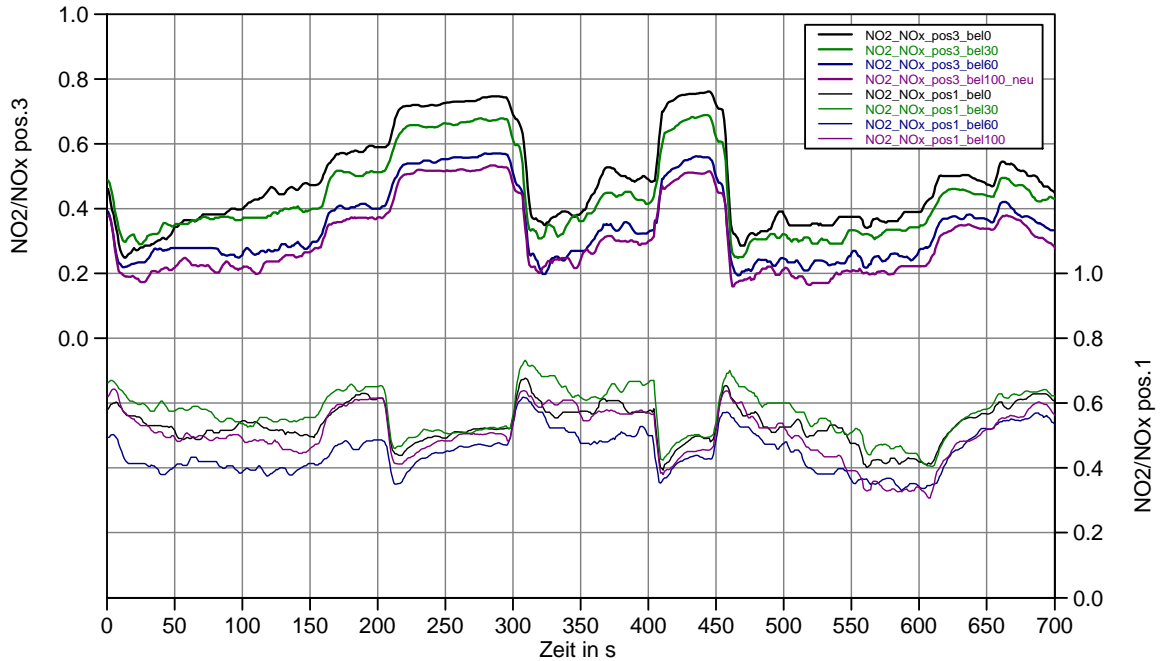


Abbildung 4.21: Beladungseinfluss auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis von KAT 249

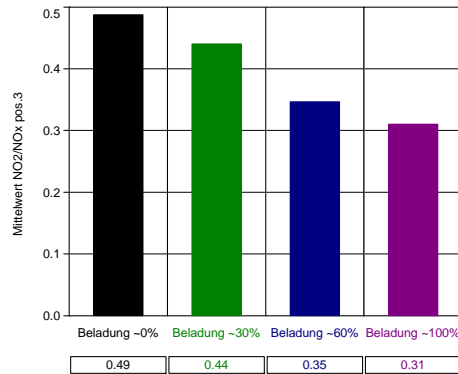
Bei den neuwertigen Katalysatoren (Abbildung 4.20 und 4.21) konnte kein bzw. geringer Einfluss des Beladungszustandes auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis festgestellt werden. Das höhere  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis im Katalysator 289 lässt sich auf das erhöhte Verhältnis an der Messposition eins zurückführen.



**Abbildung 4.22:** Beladungseinfluss auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis von KAT 288

Bei Betrachtung von Abbildung 4.22 fällt, im Gegensatz zu den neuwertigen Katalysatoren, ein deutlich abweichendes  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis an der Messposition drei auf. Der gealterte Katalysator 288 zeigt einen Einfluss des Dieselpartikelfilterbeladungszustandes auf das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses. Dabei sinkt das Verhältnis mit zunehmender Beladung. Unter Berücksichtigung des niedrigeren  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis an Messposition eins (vor DOC) ist eine deutliche Verhältnisabnahme ersichtlich.

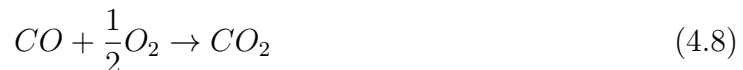




**Abbildung 4.23:** Mittelwert des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis über die Beladung an Katalysator 288

In Abbildung 4.23 ist der deutliche Zusammenhang zwischen Beladung und  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Mittelwert dargestellt.

Das Sinken des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnisses ist auf eine Oxidation des Rußes zurückzuführen. Durch eine kontinuierliche Regeneration (CRT) wird dabei Ruß mithilfe von  $\text{NO}_2$  bei Temperaturen von  $250\text{-}350^\circ\text{C}$  oxidiert. Bei dieser kontinuierlichen Oxidation wird Stickstoffmonoxid (NO) gebildet.



Durch diese teilweise Regeneration können die Regenerationsintervalle verlängert werden. Dies stellt jedoch durch die verschiedenen Fahrbedingungen keinen Ersatz für weitere Regenerationsmaßnahmen dar.

Die hierbei vermessenen Katalysatoren senken das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis über den Oxidationskatalysator, was durch die HC und CO Konvertierung verursacht werden kann. Bei einer Beladung beginnt in der Regel ein Oxidationsprozess der vermehrt NO bildet und somit das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis verringert. Über eine katalytische Beschichtung der Dieselpartikelfilter jedoch kann das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis wieder angehoben werden. Dieses Sinken tritt jedoch nur bei den vermessenen gealterten Katalysatoren auf, was darauf schließen lässt, dass im Gegensatz zu den neuwertigen Katalysatoren die katalytische Beschichtung hierbei durch Alterungseffekte nicht die für die Russreduktion nötige Menge an  $\text{NO}_2$  zur Verfügung zu stellen kann.

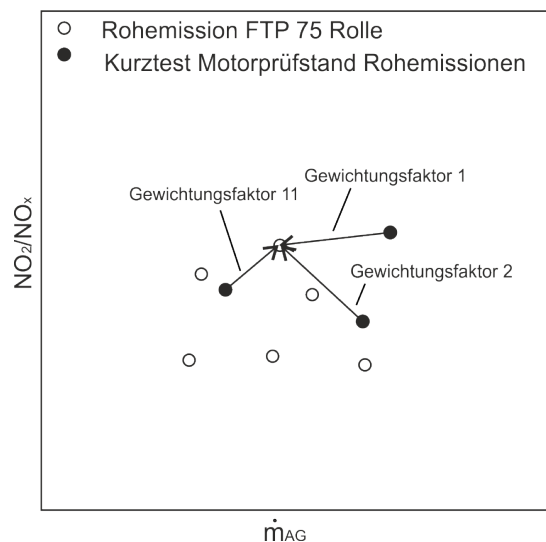
# 5 Interpolation des Kurztestes

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem simulatorischen Teil der Diplomarbeit. Hier soll ein Überblick über die Systematik der Simulationsrechnung gegeben werden.

Durch eine Interpolationsrechnung sollen die Potentiale der einzelnen Varianten, bestehend aus einem Oxidationskatalysator und einem Partikelfilter, sowie deren durch Alterung bedingte Veränderung des Konvertierungsverhaltens im FTP-75-Fahrzyklus festgestellt werden können.

## 5.1 Vorgehensweise der Interpolationsrechnung

Der in Kapitel 4 behandelte Kurztest dient nun als Eingangsbasis für eine Interpolationsrechnung. In vorangegangenen Untersuchungen wurde mittels statistischer Auswertemethoden eine Korrelation zwischen Abgasmassenstrom und  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis festgestellt. Auf Basis dieser Korrelation erfolgt die Festlegung von Gewichtungsfaktoren. Mittels dieser Gewichtungsfaktoren soll nun, mit den Punkten im Kurztest, auf die jeweiligen gesuchten Größen im FTP-75 rückgerechnet werden.



**Abbildung 5.1:** Systematik der Interpolationsrechnung: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren

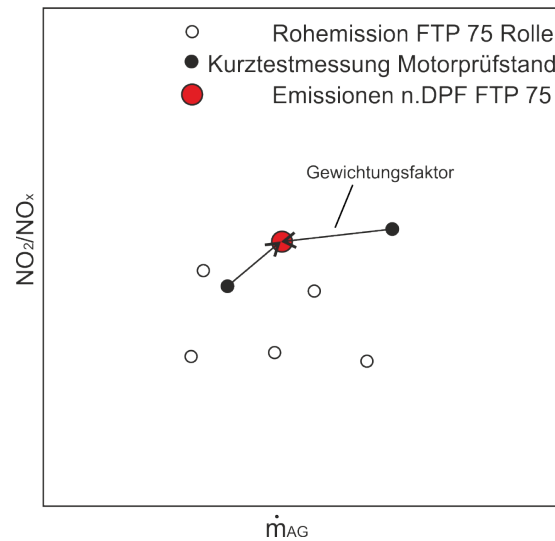
In Abbildung 5.1 soll die grundlegende Systematik der Interpolation dargestellt werden. Die mathematische Erklärung wird in diesem Kapitel noch näher erläutert. Zu-

erst müssen die Gewichtungsfaktoren berechnet werden. Diese Ermittlung der Gewichtungsfaktoren erfolgt durch Berechnung der Abstände zwischen einem Punkt im FTP-75-Fahrzyklus (Rollenmessung) und dem gemessenen Kurztestpunkt (Abbildung 5.1). Dieser Gewichtungsfaktor wird später für die Berechnung sämtlicher Abgaskomponenten herangezogen. Für jeden einzelnen Punkt im FTP-75-Fahrzyklus werden 11 Gewichtungsfaktoren berechnet. Diese 11 Gewichtungsfaktoren berechnen sich aus den 11 Lastpunkten des Kurztests. Für die Auflösung des Fahrzyklus wurde 1 Hz gewählt. Exemplarisch werden hier zwei Gewichtungsfaktoren berechnet.

$$GW_1 = \frac{1}{(\Delta \dot{m}_{AG})_1^2 + (\Delta \frac{NO_2}{NO_x})_1^2} \quad (5.1)$$

$$GW_{11} = \frac{1}{(\Delta \dot{m}_{AG})_{11}^2 + (\Delta \frac{NO_2}{NO_x})_{11}^2} \quad (5.2)$$

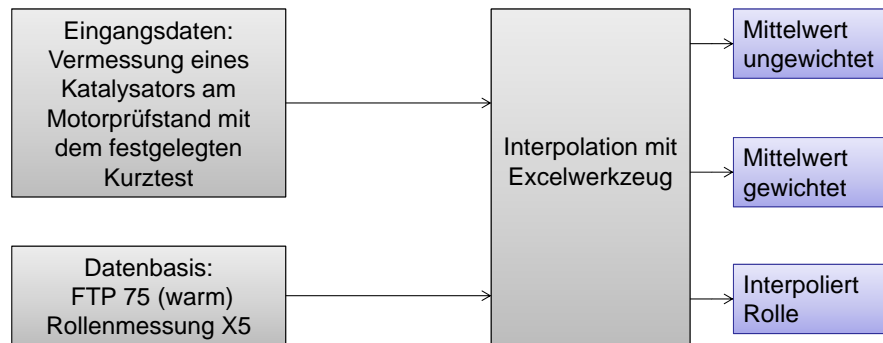
Nach Berechnung der Gewichtungsfaktoren werden diese exemplarisch für die Berechnung der Abgaszusammensetzung nach dem DPF herangezogen (Abbildung 5.2). Hier werden ebenfalls wieder exemplarisch die HC-Emissionen berechnet.



**Abbildung 5.2:** Systematik der Interpolationsrechnung: Anwendung der Gewichtungsfaktoren

$$HC_{nDPF} = GW_1 * HC_{nDPFKurztest1} + \dots + GW_{11} * HC_{nDPFKurztest11} \quad (5.3)$$

Somit werden zusammenfassend zuerst die Gewichtungsfaktoren der 11 Lastpunkte des Kurztestes für jeden einzelnen FTP-75 Lastpunkt ermittelt. Dann werden mit Hilfe dieser Gewichtungsfaktoren die Emissionen sämtlicher Schadstoffe exemplarisch nach dem DPF



**Abbildung 5.3:** Ablaufschema der Interpolationsrechnung

berechnet. Die dadurch berechneten Größen für den FTP-75-Fahrzyklus werden zeitlich gemittelt um die Katalysatoren vergleichen zu können.

Das Schema der Interpolationsrechnung ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Als Interpolationsbasis dienen hierbei am Rollenprüfstand vermessene Rohemissionen eines FTP-75 (warm) Fahrzyklus.

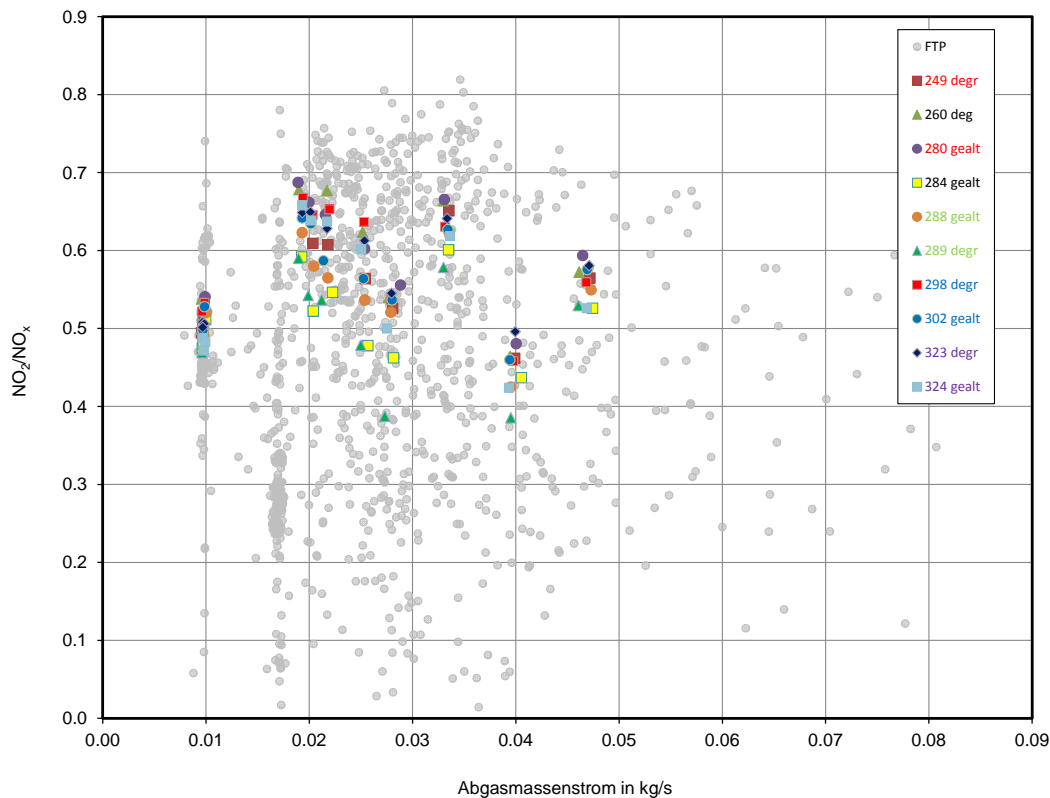
Die Ausgabewerte der Interpolation sind der ungewichtete und gewichtete Mittelwert. Der ungewichtete Mittelwert entspricht dem zeitlich gemittelten Wert über dem gemessenen Kurztest am Motorprüfstand.

Der gewichtete Mittelwert entspricht dem Mittelwert über dem Kurztest mit den gewichteten Zeitanteilen in einem FTP-75-Fahrzyklus.

Der Wert Interpoliert Rolle ist der zeitliche Mittelwert eines FTP-75 (warm), der auf Basis des Kurztestes und des gemessenen FTP-75 auf der Rolle berechnet wird. Als Interpolationsparameter werden hierbei das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis im Rohabgas und der Abgasmassenstrom verwendet die in einem Vorprojekt als statistisch repräsentative Größen gewählt wurden. Dies wurde mit Messdaten und einem statistischen Analyseverfahren durchgeführt. Dabei wurde mit einer Regressionsanalyse ein statistischer Zusammenhang zwischen dem  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis und dem Abgasmassenstrom festgestellt. Mit diesem Regressionsverfahren konnte somit ein quantitativer Zusammenhang nachgewiesen werden.

## 5.2 Datenbasis und Analyseverfahren

In Abbildung 5.4 ist als Datenbasis für die Interpolationsrechnung das Ergebnis der Rollenmessung (FTP-75 warm) als graue Punktwolke dargestellt. Die Interpolation wird über  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis und den Abgasmassentrom durchgeführt. Die eingefärbten Symbole stellen die einzelnen Lastpunkte der jeweils vermessenen Katalysatoren in den Kurztests dar. Die jeweils gleich eingefärbten Beschriftungen in der Legende stellen die Paarung der Katalysatoren dar. Wie man feststellen kann, befinden sich alle Lastpunkte innerhalb, jedoch in der oberen Hälfte der Interpolationswolke.



**Abbildung 5.4:** Rollenmessung FTP-75 mit allen Kurztests

In Abbildung 5.5 sind die Kurztestpunkte im PHEM FTP-75 Feld (aus PHEM Simulation) aufgetragen. In der Simulation ist ein niedrigeres  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis als in der Rollenmessung vorhanden. Der Grund für dieses niedrige Verhältnis wird in Kapitel 7 erläutert. Dies ist für die Interpolation eine nicht optimale Ausgangsbasis da die Kurztestpunkte im oberen und teilweise sogar über dem FTP-75 Feld liegen. Die gesamten Ergebnisse der Interpolationsrechnung werden anschließend in Kapitel 8 dargestellt.

Die Interpolation wird mit Hilfe des Shepard-Verfahrens durchgeführt. Dabei wer-

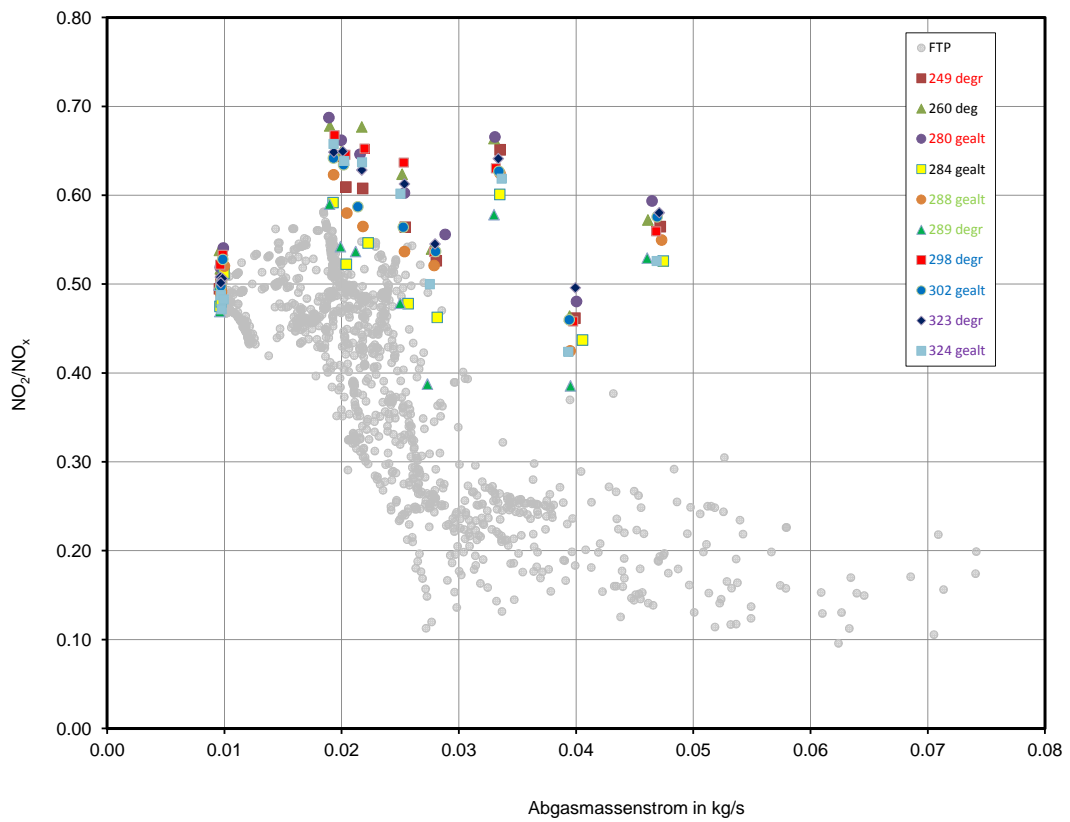


Abbildung 5.5: PHEM Simulation FTP-75 mit allen Kurztests

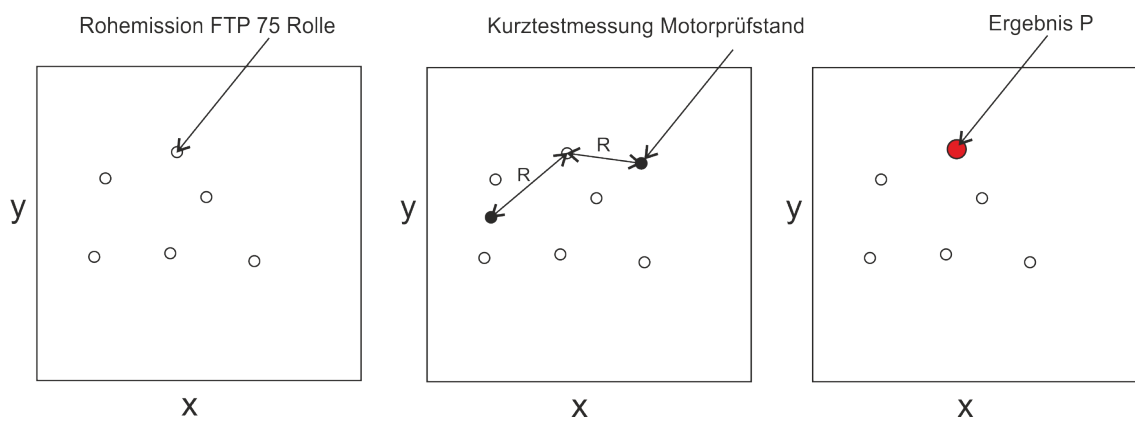


Abbildung 5.6: Interpolationsmethode

den die Emissionswerte aller innerhalb eines vorzugebenden Radius um den gesuchten Punkt herangezogen. Diese Punkte innerhalb des Radius werden nach ihrem Abstand zu dem gesuchten Punkt gewichtet. Zur Gewichtung wird hier das Quadrat des Abstandes verwendet.[12]

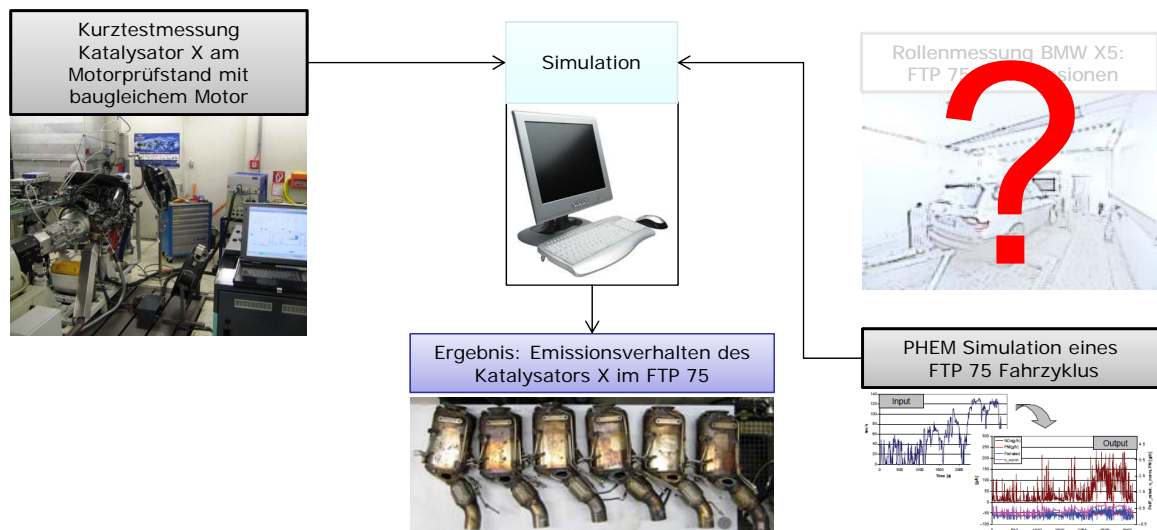
$$P = \frac{\sum(\frac{1}{R^2} \cdot E_{Kurztest-i})}{\sum \frac{1}{R^2}} \quad (5.4)$$

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2} \quad (5.5)$$

Mit  $P$  wird der nach der Shepard-Methode interpolierte FTP-75 Emissionswert in Formel 5.4 berechnet. Als Eingangsdaten wird die Summe aller  $E_{Kurztest-i}$  (Ergebnisspunkte des Kurztest) innerhalb des Radius das Aufnahmekriteriums gebildet. Bei der Interpolation wird keine Radiusbegrenzung der Shepard-Methode verwendet. Somit sind alle Punkte Interpolationsrelevant. Der Radius berechnet sich aus Formel 5.5 und ist der Abstand zwischen dem gesuchten Punkt und dem Kennfeldpunkt in der x-y Ebene. In Abbildung 5.6 wird diese Methode veranschaulicht. Über die Interpolationsparameter, in diesem Fall Abgasmassenstrom und  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis wird die Interpolation durchgeführt. Im ersten Bild ist die Datenbasis, die gemessenen Rohemissionen im FTP-75 auf der Rolle, zu sehen. Nach einer Kurztestmessung eines Katalysators am stationären Motorprüfstand wird über den Abstand der einzelnen Kurztestpunkte auf die Datenbasis, das Abgasnachbehandlungspotential des Katalysators im FTP-75 als Ergebnis  $P$  berechnet. Diese einzelnen Punkte werden dann gemittelt und als Wert Interpoliert Rolle ausgegeben.

## 6 Simulation

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Versuch den Rollentest durch eine Simulation, auf Basis eines stationären Motorkennfeldes, zu ersetzen. In Abbildung 6.1 ist erkennbar, dass die Simulationsrechnung unter Zugrundelegung von zwei verschiedenen FTP-75 Eingabedatensätzen durchgeführt wurde. Den ersten Datensatz stellt dabei der real vermessene Rollentest dar. Der zweite Datensatz wird von der PHEM Simulation gebildet.



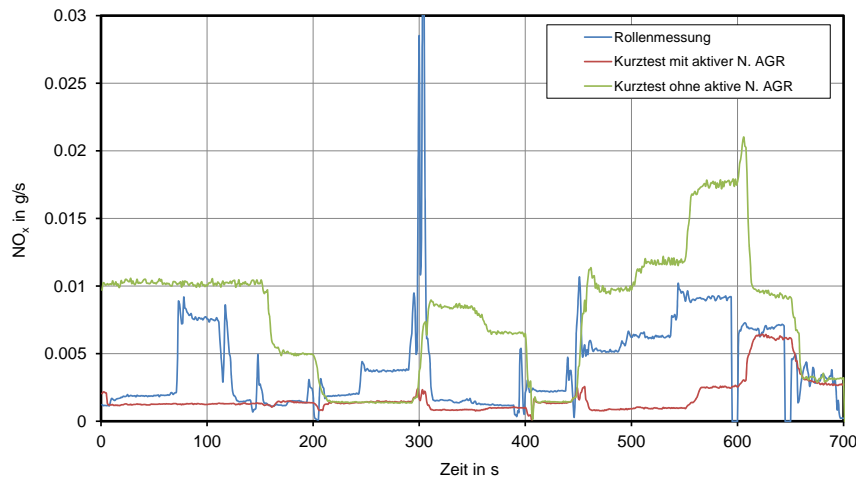
**Abbildung 6.1:** Vergleich der Stickoxidemissionen von verschiedenen Kurztests

Der Grund für diese Vorgehensweise lag im unsicheren Betriebsverhalten des Fahrzeuges während der Rollenmessung. Auf diese Unsicherheiten soll im folgenden noch näher eingegangen werden. Zu dem damaligen Zeitpunkt war es nicht möglich das bei den zuvor durchgeführten Rollenmessungen verwendete Fahrzeug oder ein identisches Fahrzeug zu vermessen. Des Weiteren waren keine FTP-75 Rohemissionsmessungen eines anderen gleichwertigen Fahrzeuges mit selben Motortyp vorhanden. Aus diesem Grund wurde versucht den Rollentest mittels einer Simulationsrechnung, auf Basis des vermessenen Kennfeldes, erneut zu generieren.



## 6.1 Einfluss des Abgasgedrucks

Bei Messungen auf dem Motorprüfstand wurde eine hohe Empfindlichkeit des Niederdruck-AGR-Systems auf den Abgasgedruck festgestellt.



**Abbildung 6.2:** Vergleich der Stickoxidemissionen von verschiedenen Kurztests

In Abbildung 6.2 sind drei verschiedene zeitliche NO<sub>x</sub>-Verläufe (Rohemissionen) des Kurztestes dargestellt. Die Stickoxid-Emissionen eines Kurztestes, durchgeführt auf der PKW-Rolle mit dem vermessenen Fahrzeug, werden mit den Kurztests am Motorprüfstand verglichen. Dabei ist ein deutlicher Unterschied in den NO<sub>x</sub>-Emissionen zu erkennen. Bei den ersten Versuchen am Motorprüfstand war der Abgasgedruck noch nicht richtig eingestellt. Aufgrund des niedrigen Abgasgedrucks scheint eine teilweise Inaktivität des Niederdruck-AGR-Systems vorzuliegen, da hier das zur Bereitstellung der notwendigen Niederdruck AGR-Rate nötige Spülgefälle nicht mehr erreicht wird. Bei der Rollenmessung des Kurztestes wurden ebenfalls Stickoxid-Emissionen mit gleicher erhöhter Tendenz wie bei der Kurztestmessung ohne korrektem Abgasgedruck gemessen, was hier ebenfalls auf ein zeitweise, nicht aktives Niederdruck-AGR-System schließen lässt. Das Absaugen bzw. ein zu starkes Absaugen von Abgas mit der CVS-Anlage am Rollenprüfstand könnte hier die Ursache für einen für das Niederdruck-AGR-System zu niedrigen Abgasgedruck sein.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurden die Messergebnisse des FTP-75 Rollentests genauer untersucht um somit Ungenauigkeiten in der Datenbasis feststellen zu können.

Der auf der Rolle vermessene sowie der simulierte FTP-75-Fahrzyklus auf Basis des Kennfeldes werden in Kapitel 6.4 verglichen.

## 6.2 Vorgehensweise

Zur weiteren Untersuchung und Analyse der Interpolationsrechnung wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die Datenbasis, den gemessenen FTP-75 aus dem Rollenprüfstandsversuch, zu verifizieren. Eine Neuvermessung bzw. Nachmessung des FTP-75 auf der Rolle war nicht mehr möglich, da das Fahrzeug nicht mehr zur Verfügung stand. Auch auf einen FTP-75-Fahrzyklus eines anderen Fahrzeuges mit identischem Motor und Datenstand konnte nicht zurückgegriffen werden. Somit wurde eine PHEM Simulation des FTP-75-Fahrzyklus zur Kontrolle gewählt.

Wie in Abbildung 6.3 dargestellt ist, ist nun ein Vergleichswert „interpoliert PHEM“ im Vergleich zum Schema in Abbildung 5.3 vorhanden.

Mit diesem Vergleichswert kann die Interpolationsrechnung mit zwei Basiseingangsdaten überprüft werden. Des Weiteren ist es möglich die simulierten Abgasemissionen auf Basis des Kennfeldes (Kapitel 3.10) mit den Emissionen der Rollenmessung zu überprüfen.

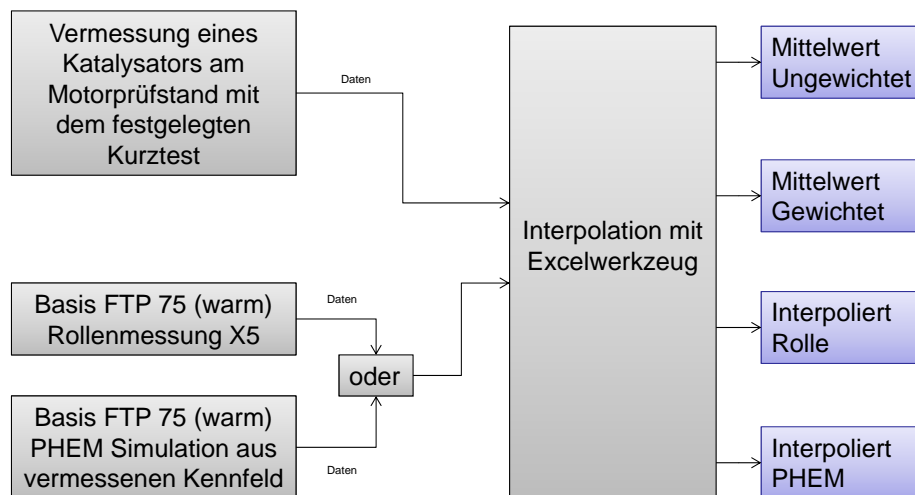


Abbildung 6.3: Ablaufschema der Interpolation und Vergleichssimulation

## 6.3 PHEM basierter FTP-75

Um eine Simulation der Abgasemissionen durchführen zu können wurde das Simulationsprogramm PHEM verwendet. Das Programm PHEM führt Simulationen der Fahrzeuglängsdynamik aus. Das Programm entstand am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik und wurde unter anderem für die Simulation von Emissionen und Energieverbrauch von PKW und NFZ entwickelt.

In Abbildung 6.4 ist schematisch der Ablauf einer PHEM Simulation dargestellt.

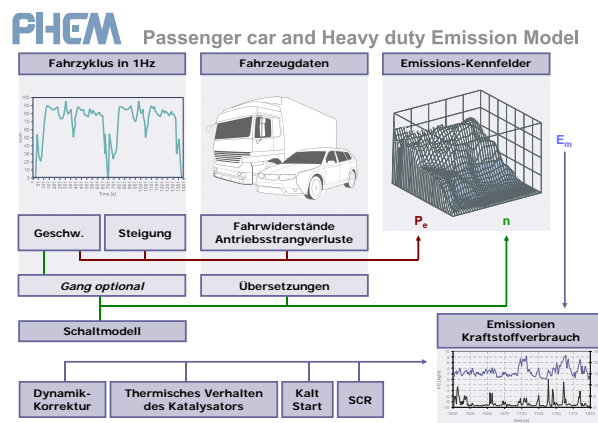


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung der PHEM Rechnung [11]

Auf Basis eines gegebenen Geschwindigkeitsverlaufs eines FTP-75-Fahrzyklus (FTP-75 (warm)), den charakteristischen Motordaten sowie dem vermessenen Motorkennfeld werden die Emissionen berechnet. Als weitere Eingangsparameter für die PHEM Rechnung wurde eine Vollastkurve und ein Fahrzeugmodell des am Rollenprüfstand vermessenen Fahrzeugs zur Verfügung gestellt. Im Fahrzeugmodell sind Reifendurchmesser, Achs- und Getriebeübersetzung und ein Gangwechselmodell für das Automatikgetriebe hinterlegt, womit die erforderliche Motordrehzahl berechnet werden kann.

Über den vorgegebenen Fahrzyklus, die Fahrwiderstände und die Verluste im Antriebsstrang wird die erforderliche Motorleistung berechnet. Aus der erforderlichen Motorleistung und der geforderten Motordrehzahl kann somit eine Interpolation der Emissionen generiert werden. Um die Emissionen interpolieren zu können müssen als Eingangsdaten normierte Emissionskennfelder in die PHEM Software eingegeben werden.

Als Datenbasis für diese Emissionskennfelder wurde hier das vermessene stationäre Motorkennfeld verwendet (siehe Abbildung 3.17 und 3.18). Die einzelnen Eingangsgrößen des Kennfeldes für die PHEM Rechnung sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

**Tabelle 6.1:** PHEM Eingangskennfeld

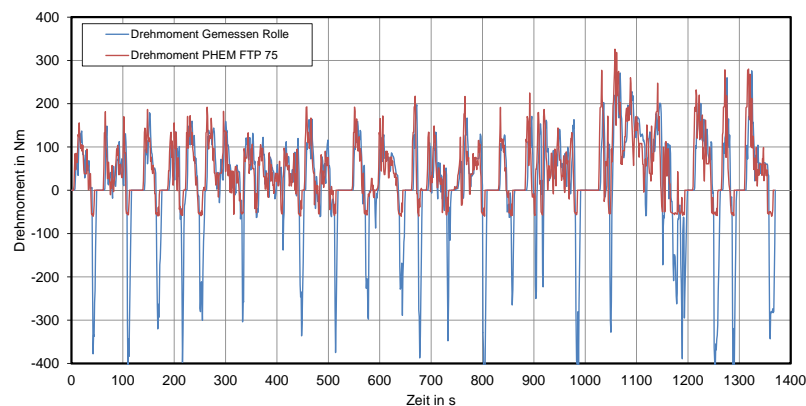
Bezeichnung	Einheit	Normierung
norm. Drehzahl	-	$n_{\text{Leer}} = 700 \text{ min}^{-1}$ $n_{\text{Nenn}} = 4200 \text{ min}^{-1}$
norm. Leistung	-	$P_{\text{Nenn}} = 200 \text{ kW}$
Temp. Rohabgas vor DOC	°C	
NO <sub>x</sub> Rohabgas	g/h	
HC Rohabgas	g/h	
NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Verhältnis	-	
CO Rohabgas	g/h	
Abgasmassentrom	kg/h	
Kraftstoffmenge	kg/h	

## 6.4 Ergebnisse der Simulation

Die PHEM Simulation wurde mit den Rollenmessungen verglichen und mit verschiedenen Verläufen überprüft.

### Drehmomenten- und Drehzahlvergleich

Wie in Abbildung 6.5 dargestellt ergeben sich für Rollenmessung & PHEM Simulation nahezu gleiche Drehmomentenverläufe. Einige Unterschiede zeigen sich durch Drehmomentenspitzen besonders im Schubbetrieb bei der Rollenmessung. Die negativen Drehmomentenspitzen der Rollenmessung entstehen durch die mechanische Bremse des Rollenprüfstandes. Die kleineren Negativspitzen zeigen den Teil des FTP-75 in dem sich der Motor im Schleppbetrieb befindet.



**Abbildung 6.5:** Vergleich der Drehmomentenverläufe im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung

Damit kann festgestellt werden, dass in der Simulationsrechnung mit gleichen Drehmoment- und Drehzahlverläufen gerechnet wurde (Abbildung 6.6).

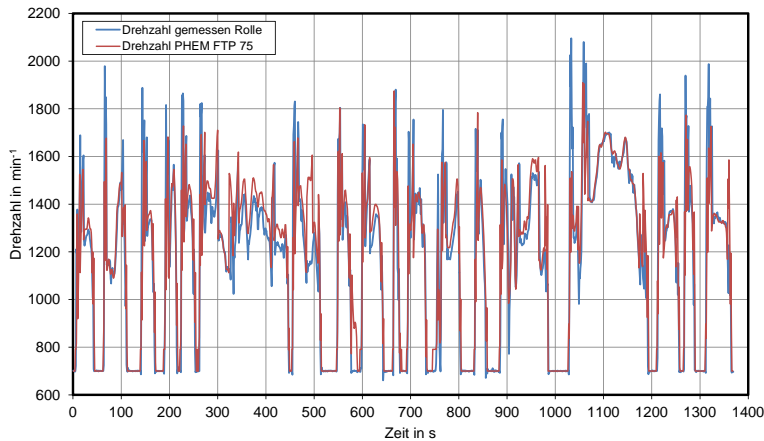


Abbildung 6.6: Vergleich der Drehzahlverläufe im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung

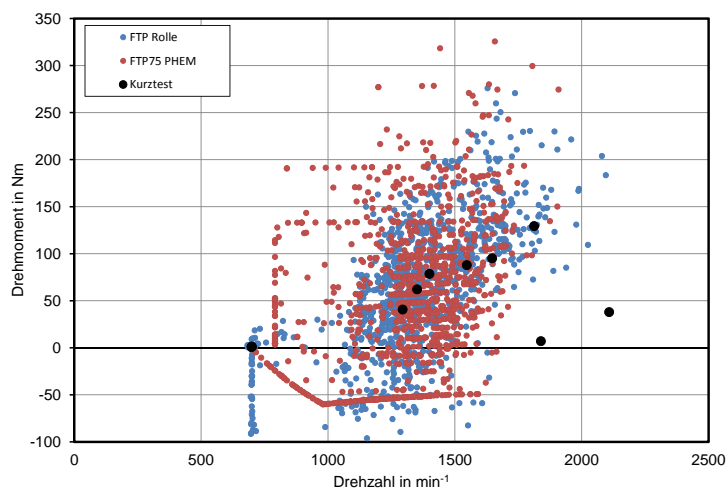
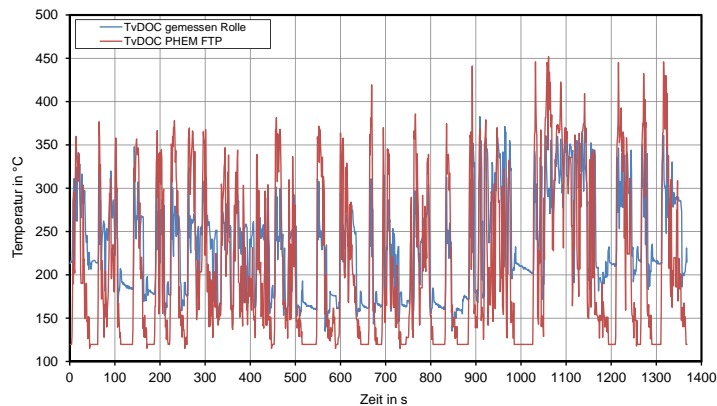


Abbildung 6.7: Drehmoment über Drehzahl Vergleich

In Abbildung 6.7 sind die Lastpunkte des Kurztestes mit dem FTP-75 aus der Rollenmessung und der PHEM Simulation zu sehen.

## Temperaturvergleich

Der Temperaturverlauf ist ein wichtiger Parameter der sowohl die Schadstoffbildung und die Emissionsminimierung beeinflusst. Für Oxidation, Reduktion und die Reaktionen unter chemischen Verbindungen besitzt die Temperatur einen hohen Einfluss.

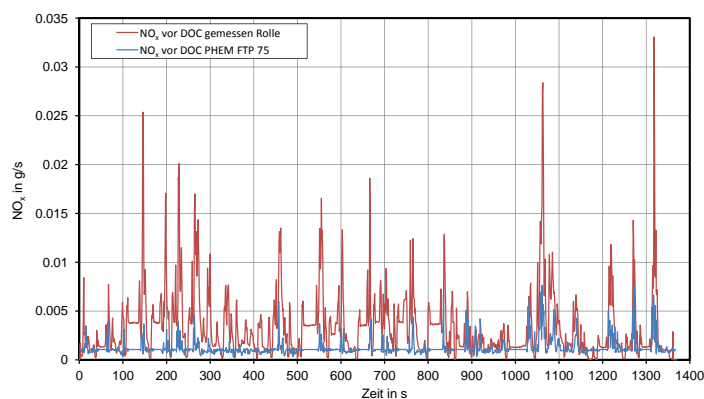


**Abbildung 6.8:** Vergleich der Temperaturen vor DOC im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung

Bei dem Temperaturvergleich vor dem Oxidationskatalysator zwischen simulierten FTP-75 und der Rollenmessung kann ein vergleichbares Temperaturniveau festgestellt werden. In der Simulation werden höhere Temperaturschwankungen ausgegeben. In den Leerläufen ist die größte Abweichung sichtbar. Diese Unterschiede lassen sich auf Temperaturträgheiten, die im Fahrzeug am Rollenprüfstand auftreten, zurückführen. Diese Temperaturschwankungen werden in der Simulation nicht berücksichtigt.

## NO<sub>x</sub>-Vergleich

Da im Kurztest bereits Abweichungen hinsichtlich NO<sub>x</sub>-Emissionen zwischen Rollenprüfstand und Motorprüfstand festgestellt werden konnten, wird in Abbildung 6.2 der FTP-75 aus Rollenmessung und PHEM Simulation gegenübergestellt.



**Abbildung 6.9:** Vergleich der Stickoxidemissionen vor DOC im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung

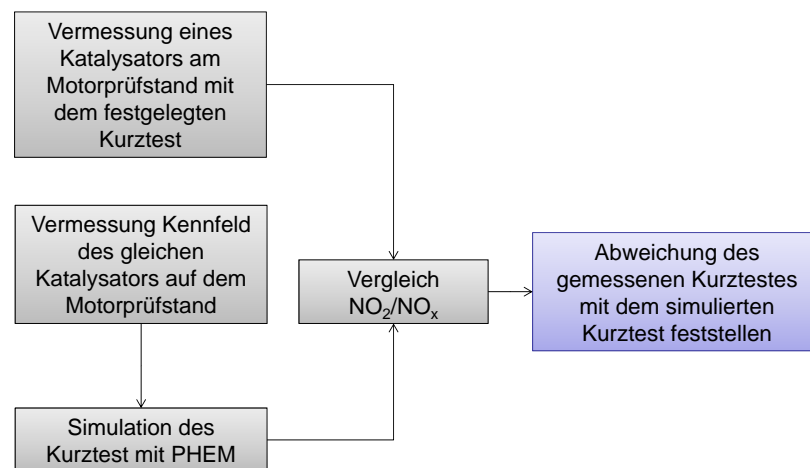
Hierbei ist ein deutlich höheres Stickoxidniveau im Rollentest feststellbar. Um die Verläufe des FTP-75 in eine Emissionsstufe nach amerikanischer Gesetzgebung einstuft zu können wurden die Werte in g/Meile ermittelt. Für die Rollenmessung wurde dabei ein Wert von 0,61 g/mi ermittelt. Für die PHEM Simulation, die auf dem auf dem Motorprüfstand vermessenen Kennfeld beruht, wurde ein Wert von 0,19 g/mi ermittelt. Der Durchschnittswert der Rollenmessung ist dabei deutlich zu hoch und erfüllt nicht die erforderlichen Grenzwerte (siehe Abbildung 1.19) was auf einen nicht korrekten Motorbetrieb während der Rollenmessung schließen lässt.

# 7 Bewertung und Analyse

## 7.1 Validität der PHEM Rechnung

Die erste PHEM Simulation war ein FTP-75-Fahrzyklus wie in Kapitel 4 dargestellt. Diese Simulation war allerdings nur mit dem FTP-75 der Rollenmessung vergleichbar. Da die Rollenmessung nicht Teil dieser Diplomarbeit war und die Messergebnisse Unsicherheiten aufzeigten, bestand nur die Möglichkeit die Simulation mit den am Motorprüfstand gemessenen Daten des Kurztests zu vergleichen. Am Motorprüfstand war eine Messung eines FTP-75 aufgrund der technischen Möglichkeiten der Bremse nicht durchführbar. Deshalb wurde eine zweite PHEM Simulation durchgeführt, die den Kurztest nachgebildet hat.

### 7.1.1 Vorgehensweise



**Abbildung 7.1:** Überprüfungsschema der Simulation

Für die Feststellung der Abweichungen im  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis wurde eine Routine, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, durchgeführt.

Um die PHEM Simulation mit den Ergebnissen des Motorprüfstandes zu vergleichen wurde im ersten Schritt der Katalysator 289 am Prüfstand vermessen. Mit diesem Ka-



talysator wurde auch das in Abbildung 3.17 beschriebene Kennfeld vermessen. Mit dieser Datenbasis wurde nun eine PHEM Simulation des Kurztestes erstellt. Die beiden vorhandenen Kurzttests aus PHEM Simulation und Prüfstandsmessung wurden nun auf Abweichungen der zeitlichen Verläufe des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnisses untersucht.

## 7.1.2 Ergebnis

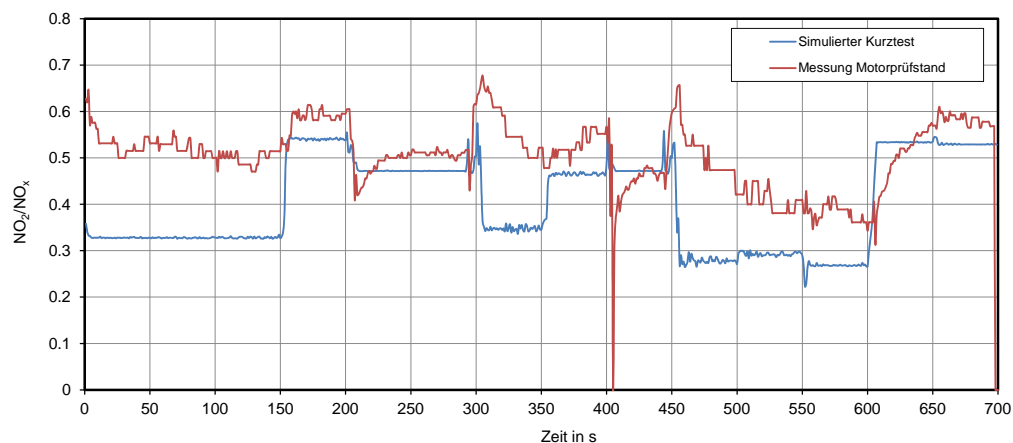


Abbildung 7.2: Simulierter und Gemessener Kurztest

In Abbildung 7.2 ist der gemessene Kurztest am Motorprüfstand und der simulierte Kurztest gegenübergestellt. Der simulierte Verlauf zeigt, im Gegensatz zum gemessenen Kurztest, ein nahezu konstantes  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis über die einzelnen Lastpunkte.

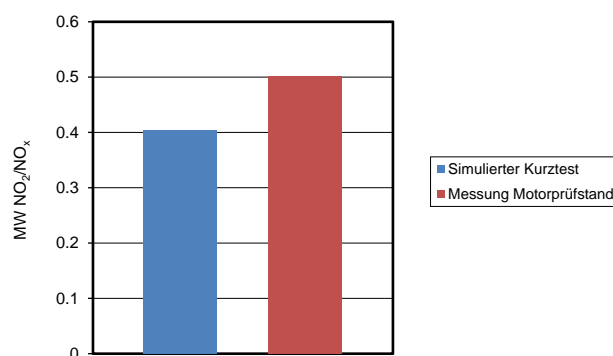


Abbildung 7.3: Zeitlicher Mittelwert des simulierten und gemessenen Kurztestes

Bei Betrachtung des Mittelwertes des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnisses der beiden Kurzttests ist zu sehen, dass der Mittelwert ( $\text{MW NO}_2/\text{NO}_x$ ) des simulierten Kurztestes deutlich niedriger liegt als der des gemessenen. In Abbildung 7.3 ist ein deutlicher Unterschied von ungefähr 20% im  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnis feststellbar.

## 7.2 Auswertung der Kennfeldmessung

### 7.2.1 Kennfelddaten

Messunzulänglichkeiten bei der Prüfstandsmessung des Kurztestes können aufgrund der Vergleichbarkeit mit anderen Kurztestmessungen, die ähnlich hohe  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Verhältnisse aufweisen, ausgeschlossen werden. Um etwaige Messfehler bei der Kennfeldmessung, auf der die PHEM Simulation beruht, ausschließen zu können wurde die Kennfeldmessung genauer untersucht.

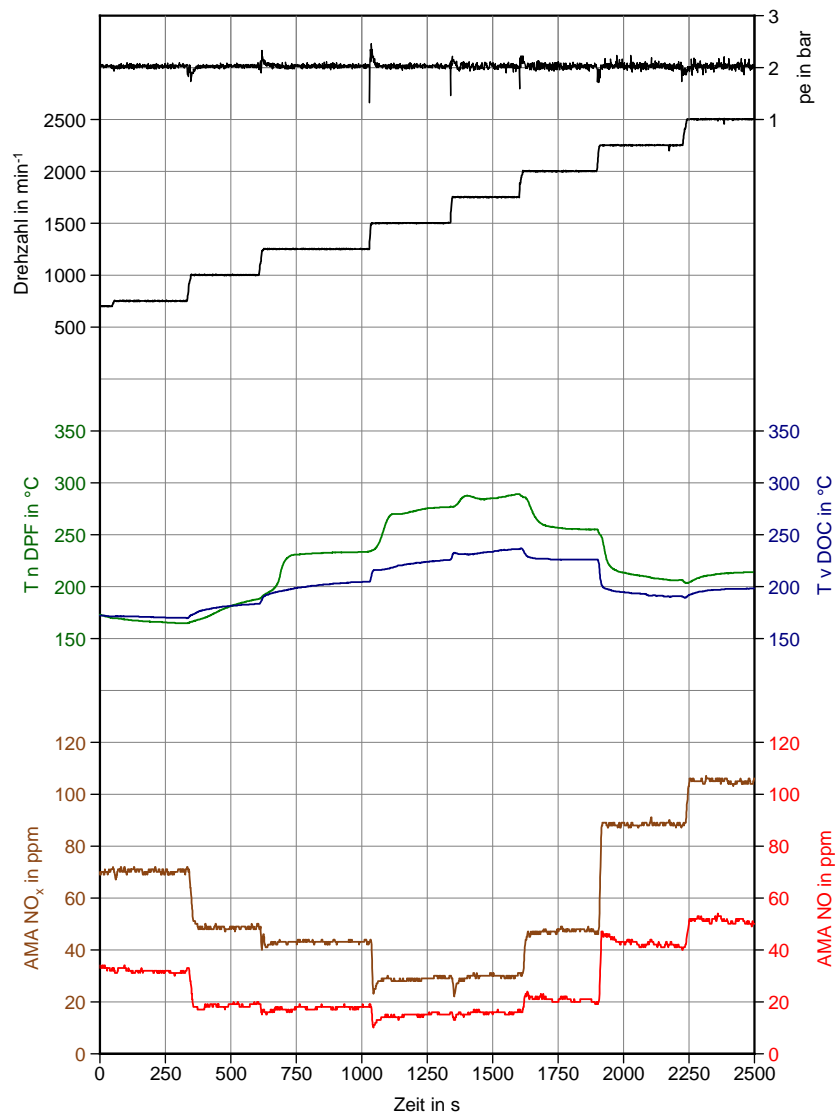


Abbildung 7.4: Kennfeldmessung

In Abbildung 7.4 wird ein Teil der Kennfeldvermessung bei konstantem Mitteldruck von ca. 2 bar dargestellt. Dabei wurde die Drehzahl stufenweise angehoben.

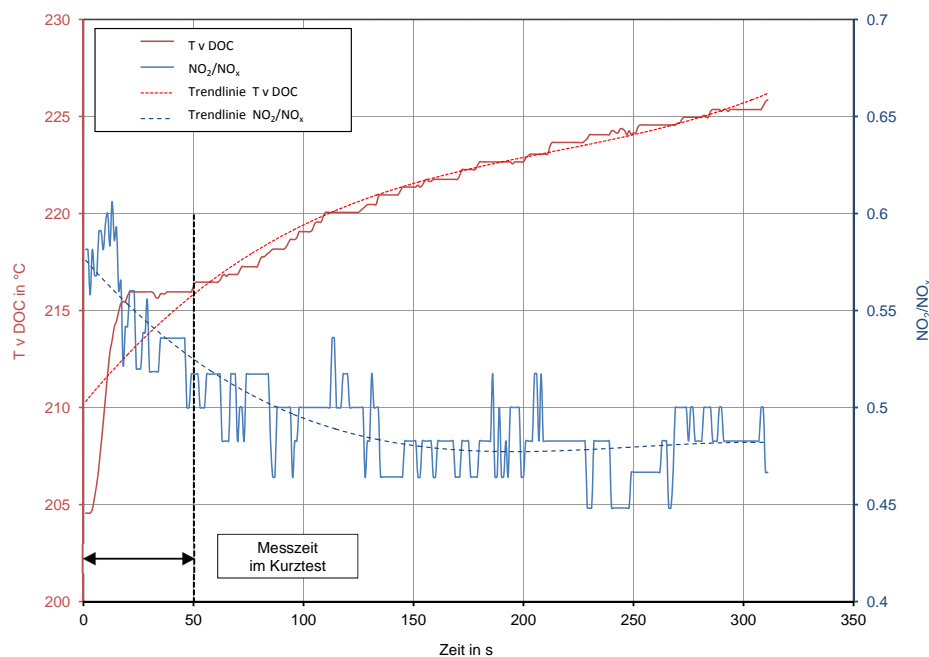
Hierbei handelt es sich um Recorder Dateien, die bei der Kennfeldmessung verwendet wurden um das Einschwingen der Temperaturen zu überprüfen.

Das gesamte gemessene Kennfeld ist in Abbildung 3.17 veranschaulicht. Die einzelnen Lastpunkte sind im Drehzahlverlauf deutlich zu sehen. Des Weiteren sind im Diagramm die Temperatur vor dem Oxidationskatalysator und die Temperatur nach dem Partikelfilter aufgetragen. Bei den Temperaturverläufen ist eine Stabilisierung über die Dauer des Lastpunktes abgebildet. Für die Kennfelderstellung wurde der zeitliche Mittelwert der letzten 30 Sekunden jedes Lastpunktes verwendet.

Die gemessenen NO und NO<sub>x</sub>-Emissionen an der Messposition 1 (vor DOC) wurden genauer untersucht. Hier sind die durch die Lastsprünge bedingten NO<sub>x</sub>-Spitzen, die durch verzögerte Regelung der AGR entstehen und die Stabilisierung des NO<sub>x</sub>-Verlaufes zu sehen.

## 7.2.2 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Stabilisierung

In Abbildung 7.5 ist das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnis und die Temperatur vor dem Oxidationskatalysator über der Zeit aufgetragen. Hier wird das Stabilisieren des Verhältnisses bei einem Lastsprung von 1250 min<sup>-1</sup> auf 1500<sup>-1</sup> bei einem Mitteldruck von 2 bar dargestellt.



**Abbildung 7.5:** NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Stabilisierung eines Lastpunktes mit sinkendem NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

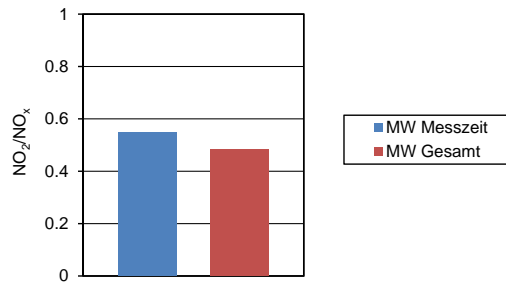


Abbildung 7.6: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Mittelwerte

Es ist deutlich ein Einstellen des chemischen Gleichgewichts zwischen NO und NO<sub>2</sub> in Abhängigkeit der Temperatur feststellbar. Hierbei sinkt das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis bis zum Einstellen des chemischen Gleichgewichts. Der Unterschied im Mittelwert, zwischen der im Kurztest gemessenen Lastpunktdauer von 50 s und der gesamten Stabilisierungszeit beträgt ca. 10 % (Abbildung 7.6).

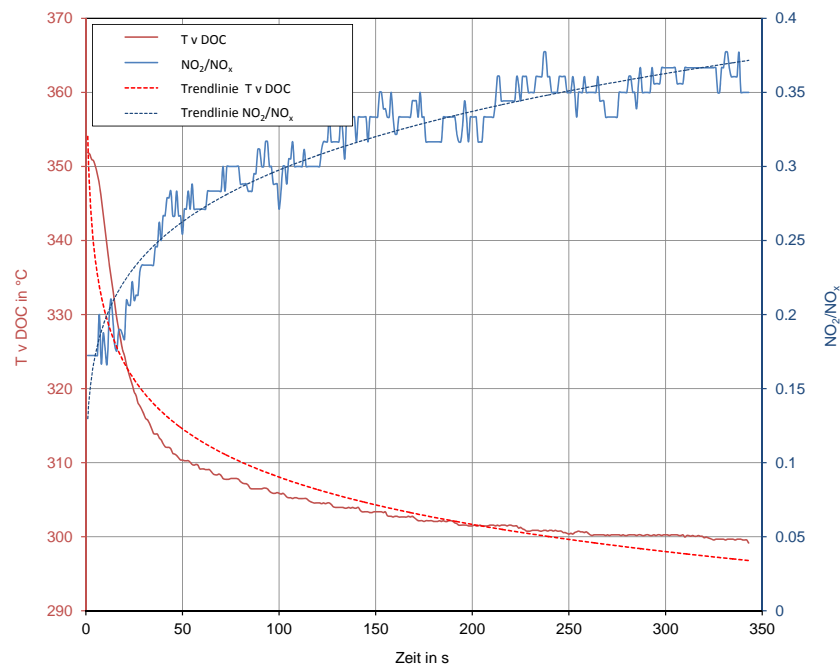
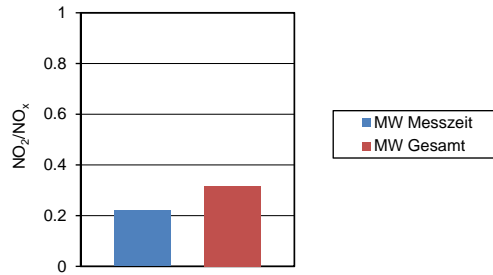


Abbildung 7.7: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Stabilisierung eines Lastpunktes mit steigendem NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

Bei fallendem Temperaturverlauf findet wie bei einem steigendem Temperaturverlauf, eine Stabilisierung des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Verhältnisses statt. In Abbildung 7.7 ist das Einschwingen über eine Zeit von ca. 350 s dargestellt. Dieses Einschwingverhalten wurde bei dem Lastsprung mit einer Drehzahl von 1750 min<sup>-1</sup> auf 2000 min<sup>-1</sup> und einem Mitteldruck von 4 bar festgestellt. Hierbei steigt das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis an.



**Abbildung 7.8:** NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Mittelwerte

Der Unterschied im Mittelwert beträgt hier ca. 30 % und ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

Durch dieses Einschwingverhalten des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses ist der simulierte Kurztest und der simulierte FTP-75 im NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis niedriger ausgefallen als die gemessenen Verläufe des Kurztests am Motor- und Rollenprüfstand.

Damit kann die PHEM Simulation des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> nur bedingt als Vergleich verwendet werden da das gemessene Kennfeld im eingeschwungenem Zustand erstellt wurde.

## NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Stabilisierung Gesamtbetrachtung

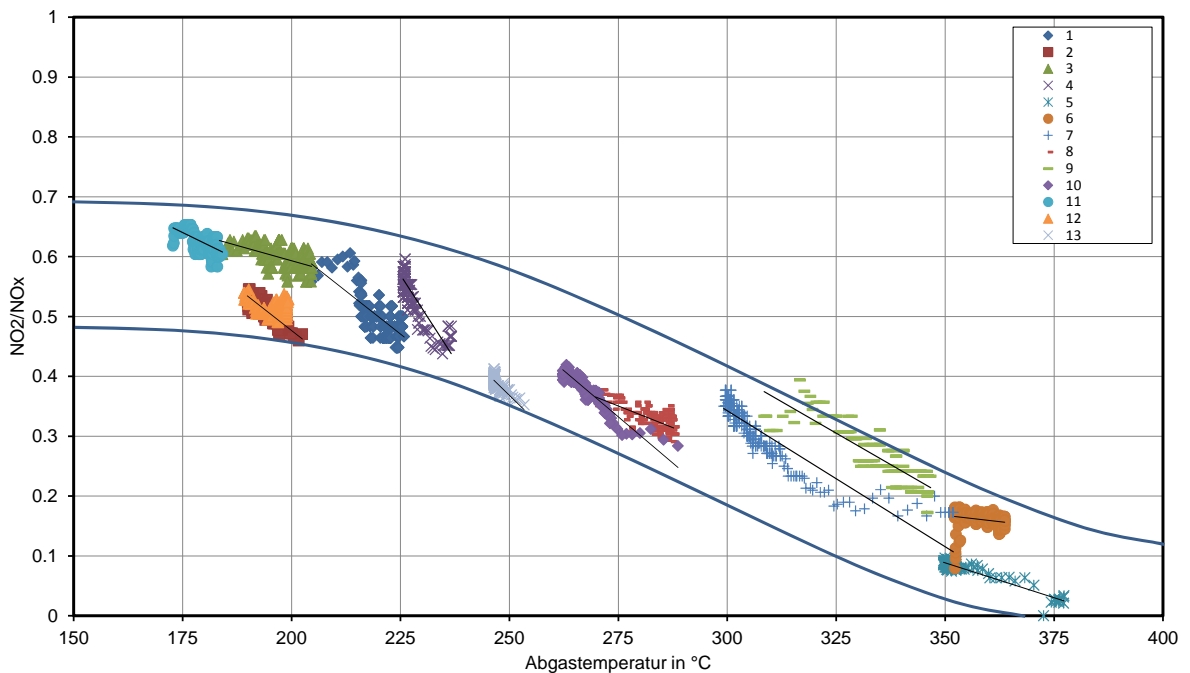
Hier wird ein Zusammenhang zwischen dem NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis und der Abgastemperatur dargestellt.

**Tabelle 7.1:** Kennfeldpunkte für die Analyse der NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Stabilisierung

Kennfeldpunkt	Drehzahl in min <sup>-1</sup>	Mitteldruck in bar	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis
1	1000	2	sinkend
2	2250	2	steigend
3	1250	2	sinkend
4	2000	2	steigend
5	1250	8	steigend
6	1500	8	sinkend
7	2000	4	steigend
8	1000	4	sinkend
9	1500	4	sinkend
10	2250	4	steigend
11	1500	2	sinkend
12	2500	2	sinkend
13	2500	4	steigend

Die Daten wurden aus dem Recorder des Prüfstandes entnommen. Insgesamt wurden 13 Kennfeldpunkte ausgewertet. Die Lastpunkte sind in Tabelle 7.1 aufgelistet. Der Lastsprung fand bei jedem Kennfeldpunkt von einer um  $250 \text{ min}^{-1}$  niedrigeren Umdrehungszahl auf die angegebenen Umdrehungen in der Tabelle bei gleichem Mitteldruck statt. Des weiteren ist in der Tabelle 7.1 angegeben ob das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis an diesem Lastpunkt gestiegen (Abbildung 7.7) oder gesunken (Abbildung 7.5) ist. Genau entgegengesetzt hat sich dabei die Temperatur verhalten.

Diese 13 Kennfeldpunkte sind in Abbildung 7.9 mit Trendlinien dargestellt. Innerhalb eines Korridors stabilisiert sich das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis.



**Abbildung 7.9:**  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Stabilisierung von verschiedenen Lastpunkten

Diese Stabilisierung ist der Grund warum die Interpolationspunkte der PHEM Simulation in Kapitel 5 niedriger ausfallen als die der Rollenmessung.

## 7.3 Stabilitätsanalyse der Interpolation

Um die Abweichungen durch die Interpolation zu überprüfen wurde eine Bewertung der Stabilität durchgeführt. Dazu wurden vier verschiedene Ausgangsdaten für die Interpolation verwendet. Als Referenzdaten wurden die Interpolationsergebnisse, die mithilfe der FTP-75 PHEM (Abbildung 7.10a) und FTP-75 Rolle (Abbildung 7.10b) erstellt wurden, verwendet. Zur Stabilitätsanalyse wurde ein FTP-75 PHEM im  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis um 20% angehoben (Abbildung 7.10c) und ein zweiter um 20% (Abbildung 7.10d) gesenkt. Als Interpolationspunkte sind die 11 Punkte des Kurztests von Katalysator 289 (deg.2) exemplarisch eingetragen.

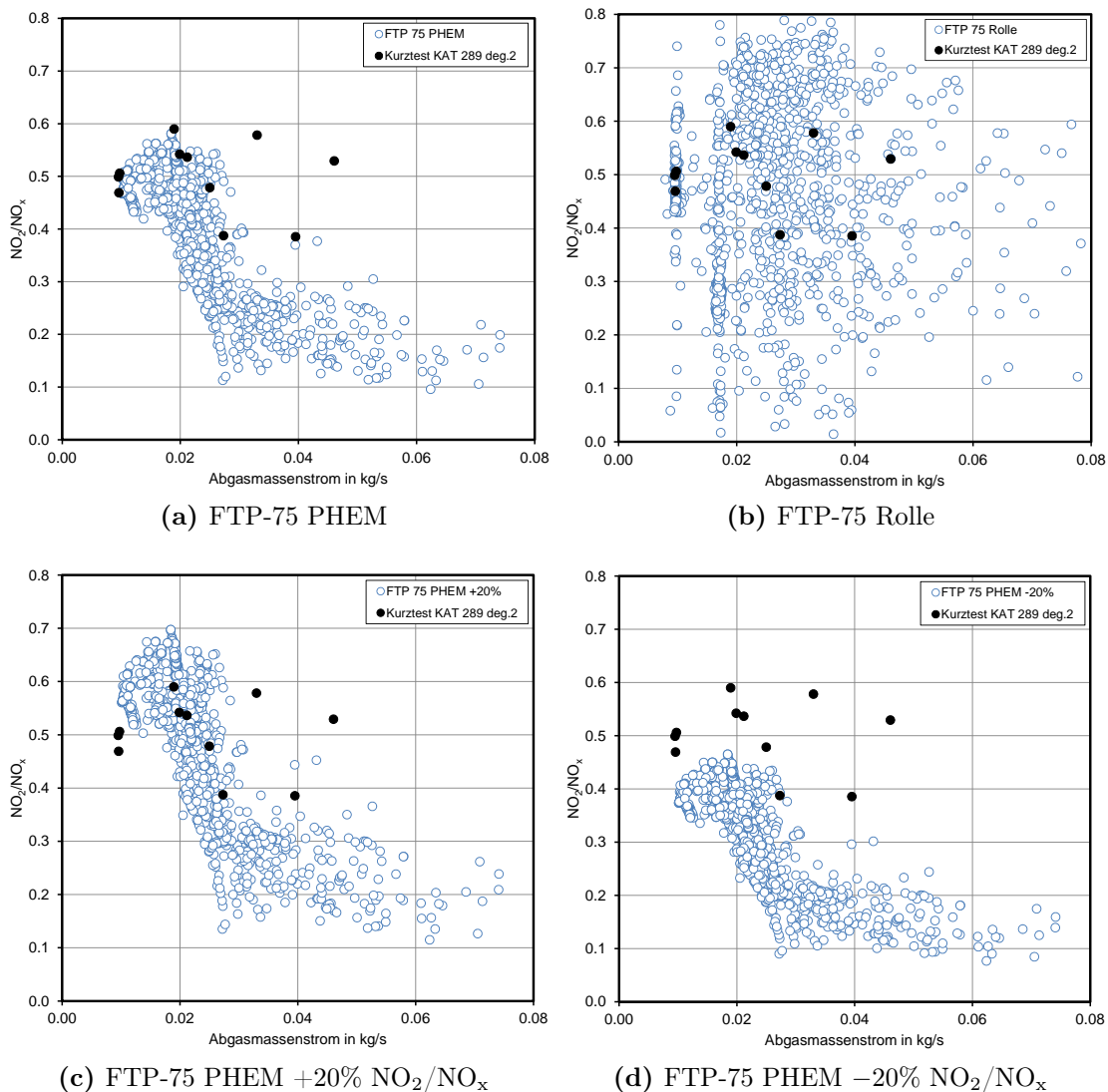


Abbildung 7.10: Datenbasis FTP-75 und Kurztest

Der deutliche Unterschied in der  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verteilung zwischen PHEM Simulation und Rollenmessung lässt sich auf mehrere Punkte zurückführen. Zum Einen ist bei diesen Rollenmessungen der korrekte Motorbetrieb nicht sicher gestellt. Des weiteren treten bei der Kennfeldvermessung, die als Eingangsdaten für die PHEM Simulation verwendet wurden, Stabilisierungseffekte auf und das dynamische Fahrverhalten kann nicht zur gänze Simuliert werden. In Abbildung 7.10d liegen die Interpolationspunkte außerhalb der FTP-75 Wolke und bietet daher im Allgemeinen eine schlechte Interpolationsqualität.

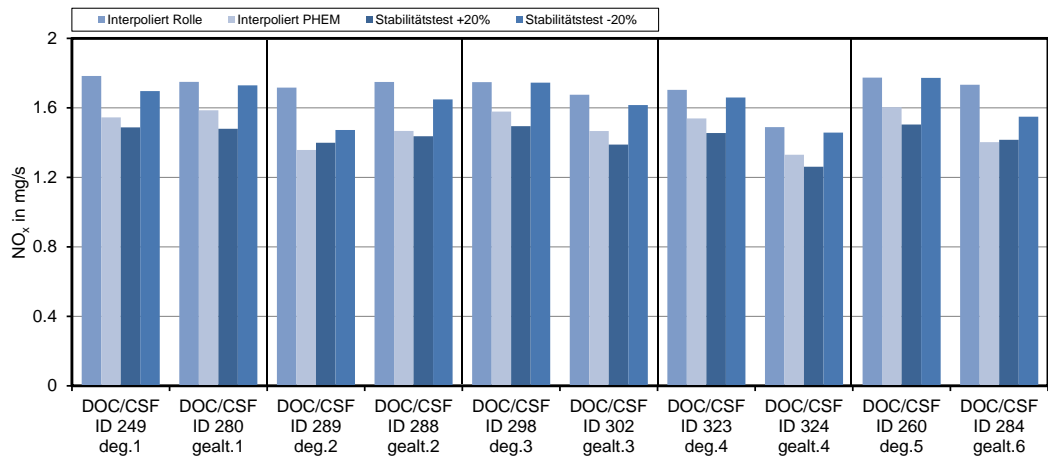


Abbildung 7.11:  $\text{NO}_x$  vor DOC, Stabilitätsanalyse

In Abbildung 7.11 sind die Ergebnisse der Interpolation jedes Katalysators eingetragen. Als Beispiel sind hier die  $\text{NO}_x$ -Emissionen vor dem Oxidationskatalysator dargestellt. Die eingetragenen Ergebnisse stellen den Mittelwert über einen FTP-75 dar. Der Vergleich zeigt eine hohe Stabilität der interpolierten Mittelwerte.



# 8 Ergebnisse aus Interpolation und Simulation

In diesem Kapitel werden sämtliche Ergebnisse der Untersuchungen aus Messung, interpolation und Simulation dargestellt.

In diesen Auswertungen werden immer der ungewichtete und gewichtete Mittelwert und der Interpolierte Wert aus Rolle und PHEM Simulation dargestellt.

## 8.1 NO<sub>x</sub>-Emissionen

In Abbildung 8.1 sind die NO<sub>x</sub>-Emissionen vor DOC und in Abbildung 8.2 die Emissionen nach DPF aufgetragen. Hierbei ist das gleich NO<sub>x</sub>-Niveau der Rohemissionen dargestellt. Um eine Aussage über die NO<sub>x</sub>-Einspeicherung treffen zu können wurde die NO<sub>x</sub>-Differenz laut Formel 8.1 betrachtet. Dabei ist festzustellen, dass geringe NO<sub>x</sub>-Einspeicherungen bei allen Katalysatoren und allen vier Bewertungsmethoden vorhanden sind.

$$\text{Diff}_{\text{NO}_x} = \text{NO}_x \text{ pos.3} - \text{NO}_x \text{ pos.1} \quad (8.1)$$

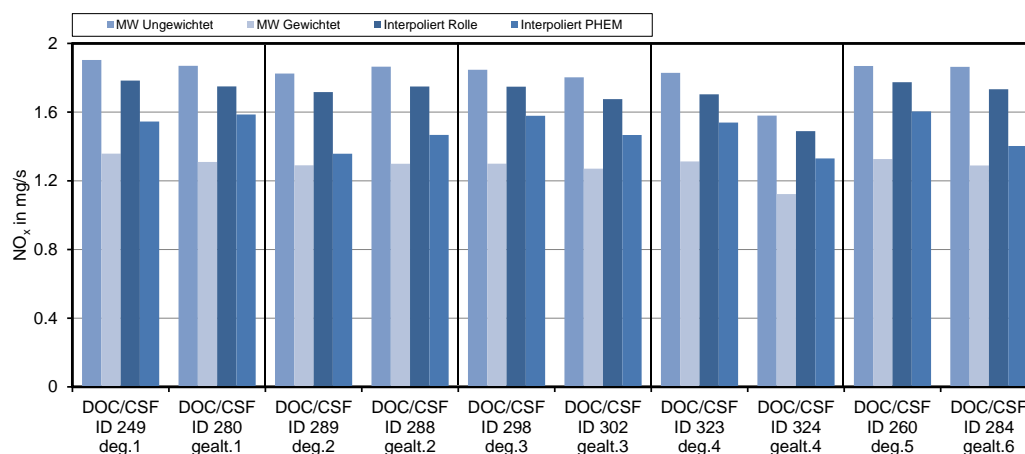


Abbildung 8.1: NO<sub>x</sub>-Emissionen vor DOC

## 8 Ergebnisse aus Interpolation und Simulation

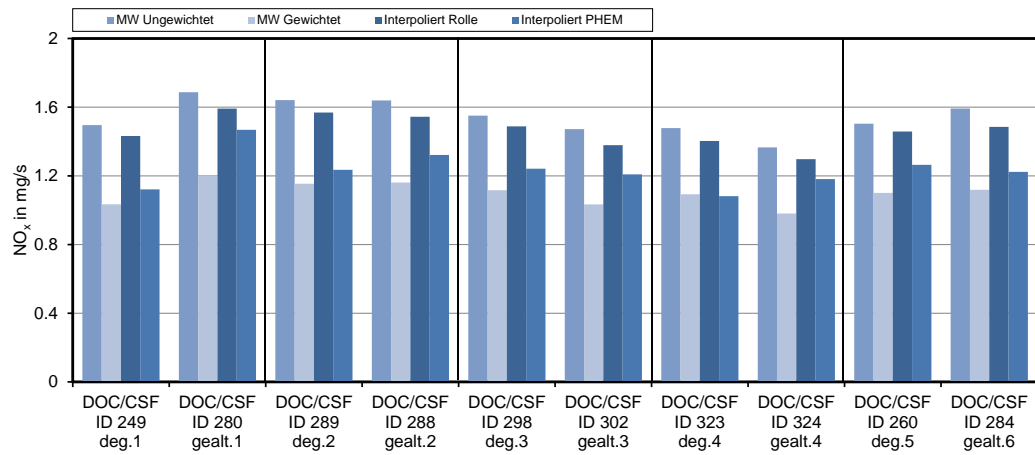


Abbildung 8.2: NO<sub>x</sub>-Emissionen nach DPF

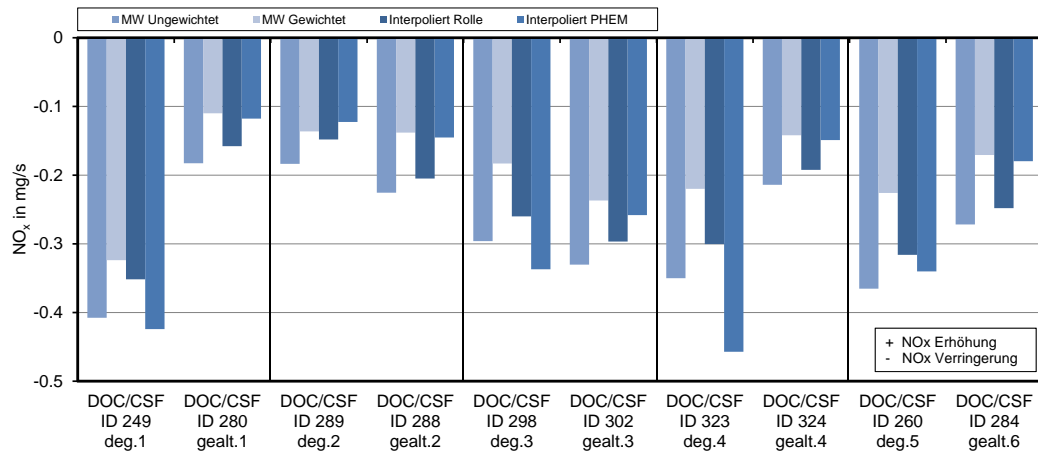


Abbildung 8.3: NO<sub>x</sub>-Differenz

## 8.2 HC-Emissionen

Wie bereits bei der Auswertung des Kurztestes festgestellt werden konnte, kann keine unterschiedliche HC-Konvertierung laut 8.2 unter den Katalysatoren festgestellt werden. Auch durch die Alterung ist nur eine minimale Verschlechterung der Konvertierung feststellbar (Abbildung 8.4).

$$\Delta\text{HC} = \frac{\text{HC}_{\text{pos.3}} - \text{HC}_{\text{pos.1}}}{\text{HC}_{\text{pos.1}}} \quad (8.2)$$

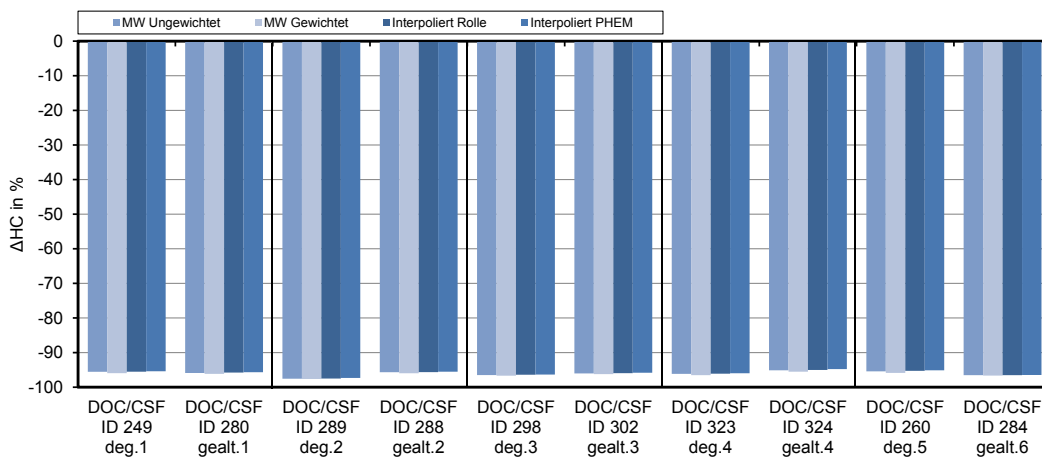


Abbildung 8.4:  $\Delta\text{HC}$

### 8.3 N<sub>2</sub>O-Emissionen

Die N<sub>2</sub>O-Bildung bzw. Änderung wurde zwischen Messposition zwei (nach DOC) und drei (nach DPF) betrachtet, da bei der Kurztestauswertung die N<sub>2</sub>O Entstehung erst durch den Oxidationskatalysator festgestellt werden konnte. In Abbildung 8.5 sind die N<sub>2</sub>O Emissionen durch den DOC dargestellt. Die N<sub>2</sub>O Änderung wird nach 8.3 berechnet und in Abbildung 8.6 veranschaulicht. Hierbei ist ein verstärktes Sinken der N<sub>2</sub>O Emissionen bei gealterten Katalysatoren durch den DPF ersichtlich.

$$\Delta N_2O = \frac{N_2O_{\text{pos.3}} - N_2O_{\text{pos.2}}}{N_2O_{\text{pos.2}}} \quad (8.3)$$

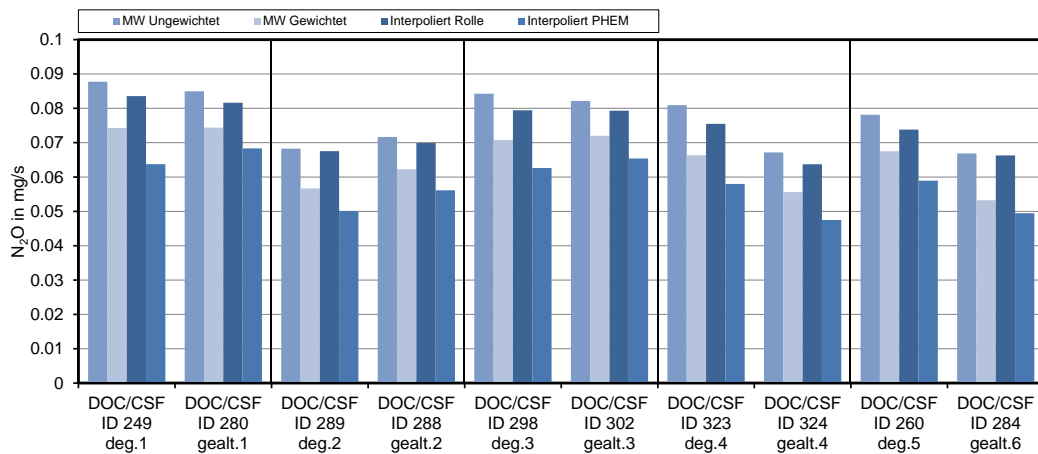


Abbildung 8.5: N<sub>2</sub>O nach dem DOC

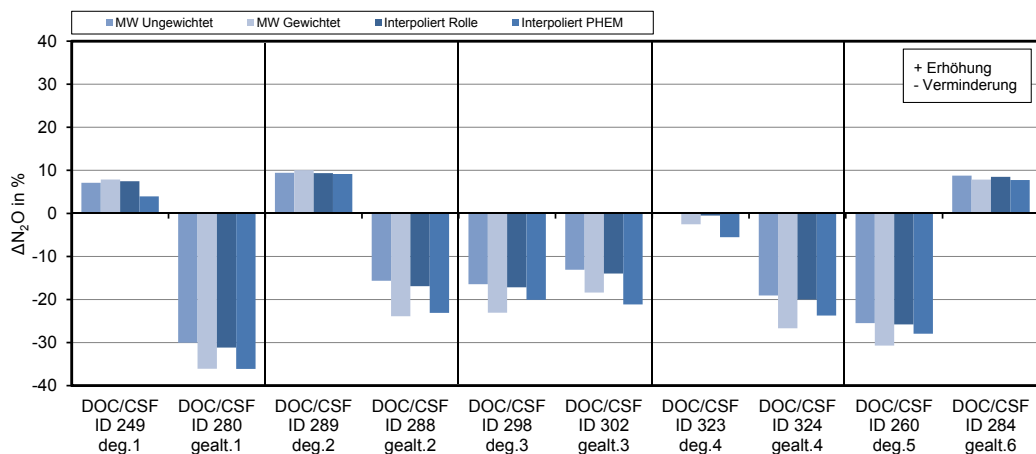


Abbildung 8.6: ΔN<sub>2</sub>O

## 8.4 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

Hierbei ist das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis vor dem DOC (Abbildung 8.7) und nach dem DPF (Abbildung 8.8) dargestellt. Eine Aussage über die Veränderung des Verhältnisses kann durch Abbildung 8.9 getroffen werden.

$$\Delta \text{NO}_2/\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_2/\text{NO}_{x\text{pos.3}} - \text{NO}_2/\text{NO}_{x\text{pos.1}}}{\text{NO}_2/\text{NO}_{x\text{pos.1}}} \quad (8.4)$$

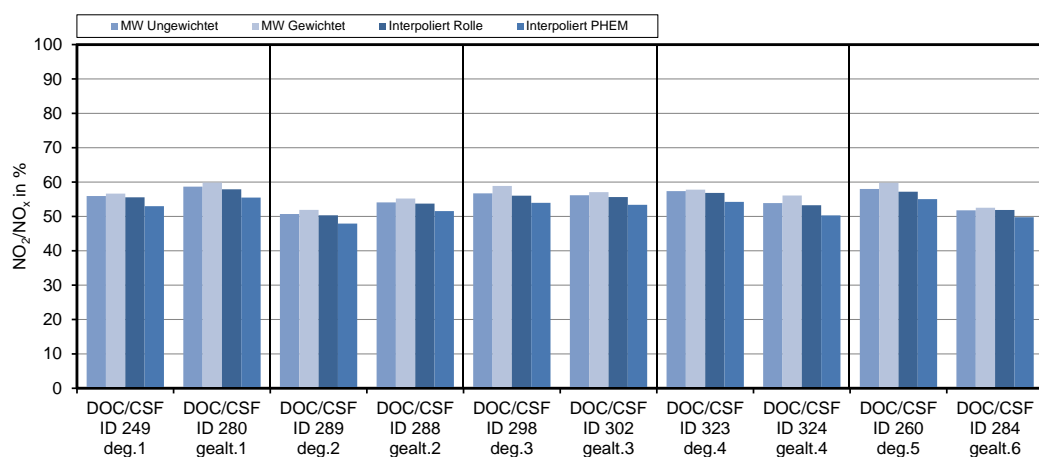


Abbildung 8.7: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis vor DOC

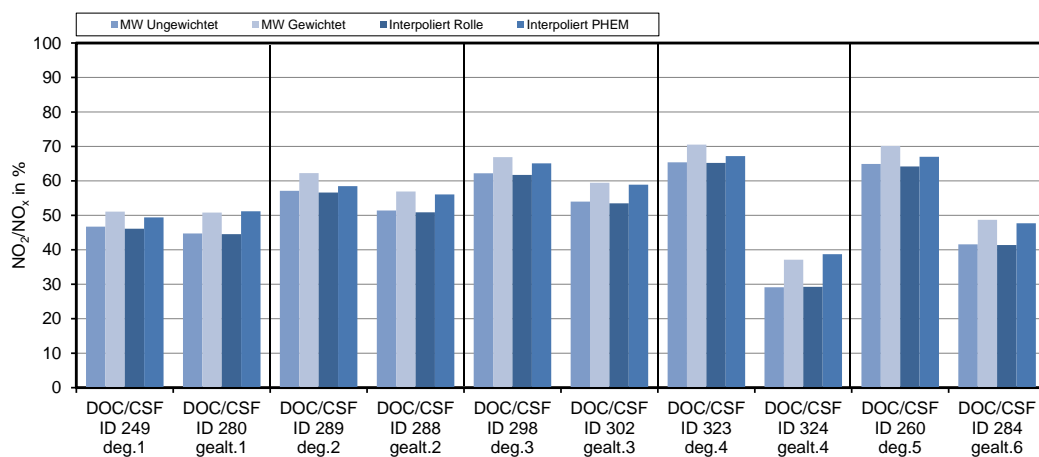


Abbildung 8.8: NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis nach DPF

Es konnte festgestellt werden, dass sich das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis vermehrt bei gealterten Katalysatoren verringert. Wie bereits erwähnt sinkt das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis bei allen Katalysatoren über den DOC und steigt durch den katalytisch beschichteten

## 8 Ergebnisse aus Interpolation und Simulation

Katalysator wieder an. Zusammenfassend wird in Abbildung 8.9 die  $\text{NO}_2$ -Veränderung über den gesamten Katalysator zwischen Messposition eins und drei dargestellt.

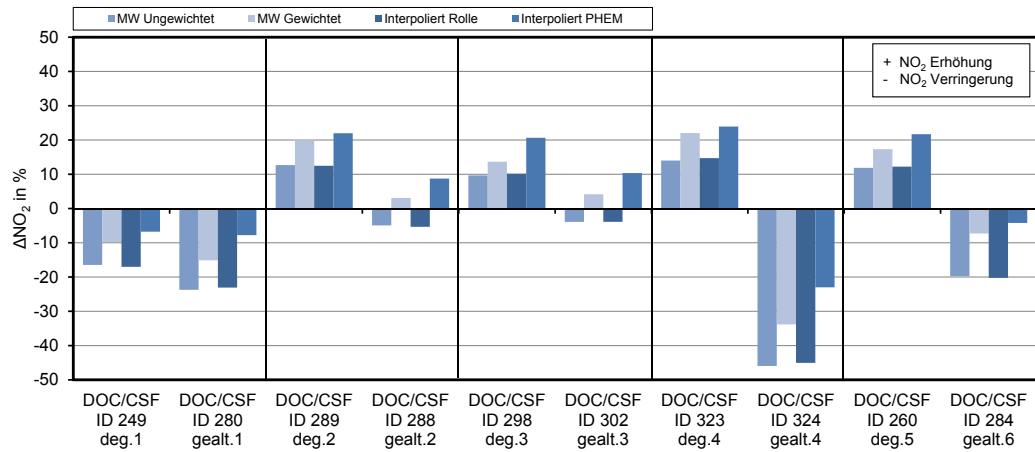


Abbildung 8.9:  $\Delta\text{NO}_2/\text{NO}_x$

Mit diesen Informationen kann eine Vorauswahl bezüglich des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses getroffen werden. Bei dieser Vorauswahl ist die Veränderung über den Katalysator und das absolute Verhältnis nach dem Katalysator von Interesse um für eventuell nachfolgende Abgasnachbehandlungskomponenten (z.B.:SCR) eine Vorauswahl treffen zu können.

## 8.5 Beladungseinfluss

Die Beladung verändert bei gealterten Katalysatoren das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis. Dabei verringert sich der  $\text{NO}_2$ -Anteil im Abgas mit steigender Beladung des Partikelfilters (Abbildung 8.11). Bei neuwertigen Katalysatoren zeigt sich das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis vom Beladungszustand unabhängig.

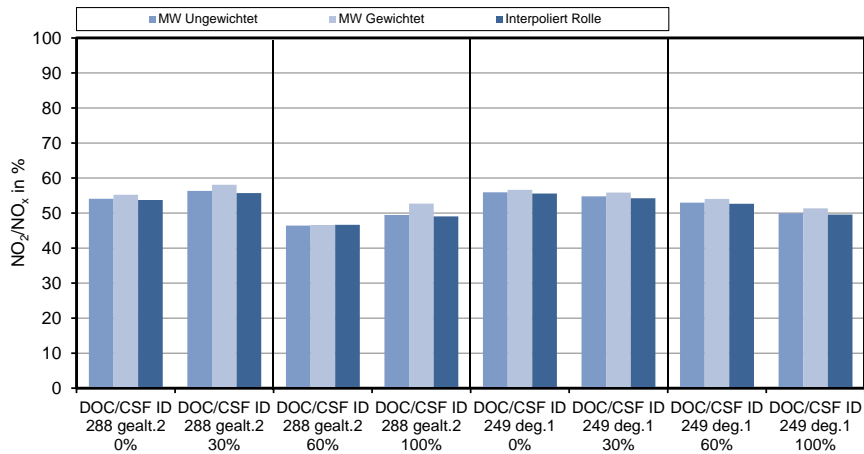


Abbildung 8.10:  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis vor DOC Beladungsabhängig

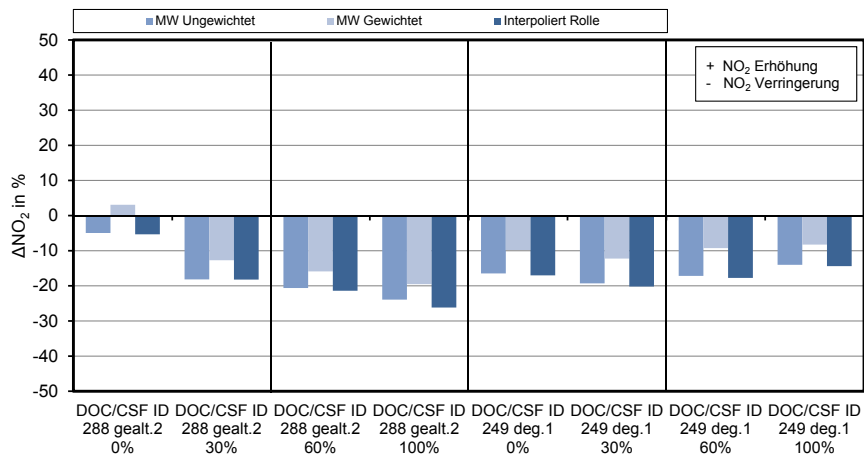


Abbildung 8.11:  $\Delta\text{NO}_2/\text{NO}_x$  Beladungsabhängig

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer Methodik zur Bewertung von Abgasnachbehandlungssystemen für unterschiedliche Fahrzeuge. Als Basis diente der US-Fahrzyklus FTP-75.

Wesentlicher Grundbestandteil dieser Methodik ist eine Simulationsrechnung, die zwei Eingabedatensätze benötigt. Der erste Eingabedatensatz stellt eine, lediglich einmal durchzuführende, Rollenmessung (Rohemissionen) der gewünschten Fahrzeug- Motorkombination auf der Fahrzeugrolle dar. Der zweite Eingabedatensatz bildet eine Kurzttestmessung, die auf einem stationären Motorprüfstand durchgeführt wird. Dieser Kurzttest beinhaltet 11 Lastpunkte und umfasst eine Dauer von 700 Sekunden.

Ein wesentlicher Vorteil der untersuchten Methodik liegt in der Reduktion der Rollenmessungen, sowie in der leichteren Zugänglichkeit (z.B. Katalysatorwechsel) des Versuchsträgers am stationären Motorprüfstand, was zu Einsparungen von Zeit und Kosten bei der Entwicklung von Abgasnachbehandlungssystemen führt.

Im Zuge dieser Arbeit wurden insgesamt zehn Katalysatoren untersucht. Diese zehn Katalysatoren bestanden aus fünf Paarungen mit jeweils einem neuwertigen (degreened) und einem gealterten Katalysator. Bei den Katalysatoren handelte es sich um eine Kombination aus Dieseloxydationskatalysator und einem Dieselpartikelfilter (DOC/DPF).

Ein weiterer Bestandteil dieser Diplomarbeit war es, die verschiedenen Katalysatorpaarungen hinsichtlich verschiedener Zielkriterien (z.B.  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis) zu untersuchen. Auswirkungen von Alterungseffekten auf das Funktionsverhalten der Katalysatoren konnten dabei unter anderem festgestellt werden.

Besonderer Wert wurde, im Zuge der experimentellen Arbeiten, auf die Konditionierung des Motorprüfstandes bzw. Versuchsträgers gelegt. Dies erwies sich als wichtig um eine vergleichbare Datenbasis der verschiedenen Katalysatoren für die nachfolgende Simulationsrechnung zu schaffen.

Während des Projektes wurden nicht reproduzierbare Zustände im Motorbetrieb der Rollenmessung festgestellt. Deshalb wurde versucht diese Rollenmessung durch eine Längsdynamiksimulation anhand von stationär gemessenen Kennfelddaten zu ersetzen.



---

In einem weiteren Schritt soll eine Adaptierung des Kurztestes für verschiedene Fahrzeuge und Motoren umgesetzt werden. Dazu ist der Kurztest unter Berücksichtigung von Motor, Getriebe und Fahrwiderständen anzugleichen.

Diese Methodik erlaubt es kostengünstig und effizient eine Vorauswahl verschiedener DOC/DPF-Varianten durchzuführen. Somit können Entwicklungskapital und Ressourcen gezielter eingesetzt werden. Abschließend soll festgehalten werden, dass mit dieser Arbeit ein Beitrag zur Optimierung und Verbesserung von Entwicklungsprozessen in der Motorenentwicklung geleistet wurde.

# Literaturverzeichnis

- [1] Braess, H. and Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg+ Teubner, 2007
- [2] Bundesanstalt Statistik Österreich: Starke Preissteigerungen bei Diesel und Benzin, [www.statistik.at](http://www.statistik.at), 11.12.2011
- [3] Chan, D.: Wechselwirkungen zwischen Sauerstoff- und NO<sub>x</sub>-Speicherung in Dieselabgaskatalysatoren, Universität Karlsruhe Institut für Technische Chemie, 2009
- [4] Daimler: Luftschadstoffe, <http://nachhaltigkeit.daimler.com>, 30.01.2012
- [5] Delphi: Worldwide emission Standards Passenger Cars & Light Duty Vehicles ,Delphi, 2011
- [6] DIW Berlin: Nr. 42/2002: Stagnation des Personenverkehrs in Deutschland, 2002
- [7] Eichseder, H.: Verbrennungskraftmaschinen Vertiefende Ausbildung, Vorlesungsskript TU Graz, 2005
- [8] Förstner, U.: Umweltschutztechnik, Springer Verlag, 2008
- [9] Funk, A.: Untersuchung des SNR-Verfahrens am Dieselmotor, Dissertation Universität Hannover Fachbereich Maschinenbau, 2001
- [10] Gruden, D.: Umweltschutz in der Automobilindustrie, Wiesbaden: Vieweg, 2008
- [11] Hausberger, S.: PHEM User Guide for Version 10, TU Graz, 2010
- [12] Hausberger, S.: Umweltauswirkungen des Verkehrs Teil 1, Vorlesungsskript TU Graz, 2011
- [13] Kehl, H.: TU Berlin, Der Kohlenstoffkreislauf, [www.tu-berlin.de](http://www.tu-berlin.de), 15.11.2011
- [14] Kraftfahrt Bundesamt: Kleine Autos sind gefragt, [www.kba.de](http://www.kba.de), 14.11.2011
- [15] Lacroix A.: Untersuchung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Stickoxidminderung im Diesel-PKW-Praxiseinsatz, Dissertation TU Kaiserslautern Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2005

- [16] Merker, G. and Schwarz C.: Grundlagen Verbrennungsmotoren, Vieweg Teubner, 2009
- [17] Mollenhauer, K. and Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotoren, 3 neubearbeitete Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2007
- [18] Winkler, A. and Ferri, D.: Analyseverfahren zur Alterung von Dieseloxydations-Katalysatoren, MTZ 6/2010 Jahrgang 71, S.428, 2010
- [19] Steinparzer, F. and Stütz, W.: Der neue BMW Sechszylinder- Dieselmotor mit Stufenaufladung, MTZ 5/2005 Jahrgang 66, S.338, 2005
- [20] Hiemesch, C. and Honeder, J.: Der neue Sechszylinderdieselmotor von BMW, MTZ 10/2011 Jahrgang 72, S.767, 2011
- [21] OPEC: OPEC Basket Price, [www.opec.org](http://www.opec.org), 27.01.2012
- [22] Philipp, S.: Untersuchung zur NO<sub>x</sub>-Einspeicherung an Ceroxid mittels IR-Spektroskopie in diffuser Reflexion, Dissertation TU Darmstadt Fachbereich Chemie, 2007
- [23] Pischinger, R. and Klell, M. and Sams, T.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, Springer Wien New York, 2009
- [24] Reif, K.: Dieselmotor-Management im Überblick ,Springer Verlag, 2010
- [25] Sams, T.: Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ Teil 1, Vorlesungsskript TU Graz, 2007
- [26] Schott, F. and Kureti, S.: Entwicklung von Katalysatoren zur effizienten NO<sub>x</sub>-Minderung bei tiefen Temperaturen im Abgas von Pkw-Dieselmotoren, Dissertation Universität Karlsruhe Institut für Technische Chemie, 2007
- [27] Steinparzer, F. and Kratochwill, H.: Zweistufige Abgasturboaufladung am BMW 3,0 Liter Sechszylinder-Dieselmotor, 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004
- [28] UPI: UPI 35 Auto-Prognose weltweit, <http://www.upi-institut.de/upi35.htm>, 11.12.2011
- [29] VCD: VCD Hintergrundpapier CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für PKW, VCD, 2008
- [30] VDA Technical Department: Clean Diesel, 2010
- [31] Votsmeier, M. and Kreuzer: Automobile Exhaust Control, OMG AG & Co KG, 2005

- [32] Welt online: Diesel tanken in Amerika? No Way!, <http://www.welt.de/motor> 2009, 30.01.2012
- [33] Wachter, W.: Biogene Kraftstoffe und Elektromobilität sowie weitere Umweltaspekte des Verkehrs, Vorlesungsskript TU Graz, 2011
- [34] Wallentowitz, H. and Freialdenhoven, A.: Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen ,Vieweg+ Teubner Verlag, 2010

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Motorisierungsgrad der Welt in PKW/1000 Einwohner [28]	1
1.2	Abgasvorschriften weltweit April 2011 [4]	2
1.3	Mobilitätsverhalten im Jahr 2000 [6]	2
1.4	Diesel- und Benzinfahrzeug Neuzulassungen in Deutschland in % [30]	3
1.5	Neuwagenzulassungen nach Segment in % [14]	4
1.6	Treibstoffpreise in Österreich mit Verbraucherpreisindex [2]	4
1.7	Rohölpreis seit 1998 in US \$ pro Barrel [21]	5
1.8	Heizwert und Gemischheizwert bei $\lambda = 1$ [23]	7
1.9	CO <sub>2</sub> -Ausstoss in globaler Betrachtung [13]	8
1.10	Schadstoffemissionen von Benzinmotor ohne und mit Katalysator und Dieselmotor [10]	9
1.11	Schadstoffbildung im direkteinspritzenden Dieselmotor [23]	10
1.12	Schadstoffbildung über Luftverhältnis [23]	10
1.13	Schadstoffbildung von Ruß und NO <sub>x</sub> [25]	11
1.14	Theoretisches Gleichgewicht von NO <sub>2</sub> /NO [9]	14
1.15	Dieselpartikel-Agglomerate unter einem TEM [17]	15
1.16	Partikelzusammensetzung des Diesellabgases [17]	15
1.17	Anzahl- und Masseverteilung von Dieselpartikeln [1]	16
1.18	FTP-75-Testzyklus [5]	17
1.19	bin Stufen [5]	18
1.20	NO <sub>x</sub> und NMOG Grenzwerte der CARB Gesetzgebung [24]	19
1.21	FTP-75-Testzyklus [5]	19
1.22	NEFZ [34]	20
1.23	Euro Grenzwerte [17]	20
1.24	Konvertierungsrate eines Katalysators [23]	21
1.25	Ausführung eines keramische Partikelfilters [24]	23
1.26	Abbrandtemperaturen eines Partikelfilters [7]	23
2.1	Ziel der Diplomarbeit	24
2.2	Gesamtschema der durchgeführten Untersuchungen	26
3.1	zweistufige Aufladung M57Top [19]	28
3.2	Betriebsmoden der zweistufigen Aufladung M57Top [27]	29
3.3	Hochdruck- und Niederdruck AGR [24]	30
3.4	Prüfstandsaufbau mit Messgeräten	32

---

3.5	Sechs der zehn vermessenen Katalysatoren . . . . .	33
3.6	Abgasentnahmestellen an den Katalysatoren . . . . .	34
3.7	Angeschlossene Emissionsmessgeräte an den Entnahmestellen . . . . .	35
3.8	Aufbau eines DOC/CSF [20] . . . . .	36
3.9	Aufgeschnittener Katalysator . . . . .	36
3.10	Schema der Emissionsberechnung . . . . .	37
3.11	Vergleich der Abgasmassenströme . . . . .	38
3.12	Vorgegebener Kurztest . . . . .	39
3.13	Kurztestpunkte . . . . .	40
3.14	Rohemissionsvergleichsmessung mit AMA und FTIR . . . . .	42
3.15	Temperaturverlauf von drei verschiedenen Messungen . . . . .	43
3.16	Angepasster Kurztest für den Prüfstandsbetrieb . . . . .	45
3.17	Vermessene Kennfeldpunkte . . . . .	48
3.18	NO <sub>x</sub> , HC, CO, NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Rohemissionen aus der Kennfeldmessung . . . . .	49
4.1	NO <sub>x</sub> -Einspeicherungsverhalten an einem Katalysator . . . . .	51
4.2	NO <sub>x</sub> -Einspeicherungsrate gemessen mit AMA CEB II und FTIR . . . . .	51
4.3	Einflussfaktoren auf die NO <sub>x</sub> -Einspeicherung . . . . .	52
4.4	Haupteinspeicherung durch NO . . . . .	53
4.5	Auswirkungen der Alterung auf die NO <sub>x</sub> -Einspeicherungsrate . . . . .	55
4.6	Vergleich der NO <sub>x</sub> -Einspeicherungsraten . . . . .	57
4.7	Vergleich der Mittelwerte NO <sub>x</sub> . . . . .	57
4.8	Vergleich der HC Messung von AMA und FTIR . . . . .	59
4.9	HC-Konvertierungsrate . . . . .	59
4.10	HC-Konvertierungsrate aller Katalysatoren . . . . .	60
4.11	Light-Off Verhalten von Katalysatoren [16] . . . . .	60
4.12	HC Konvertierungsrate Mittelwert aller Katalysatoren . . . . .	61
4.13	N <sub>2</sub> O Messung . . . . .	62
4.14	N <sub>2</sub> O Mittelwert Vergleich . . . . .	63
4.15	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis Vergleich von AMA CEBII und FTIR . . . . .	64
4.16	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis Übersicht . . . . .	65
4.17	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis der neuwertigen Katalysatoren . . . . .	66
4.18	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis der gealterten Katalysatoren . . . . .	67
4.19	Vergleich der Katalysatoren (NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis) . . . . .	68
4.20	Beladungseinfluss auf das NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis von KAT 289 . . . . .	69
4.21	Beladungseinfluss auf das NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis von KAT 249 . . . . .	69
4.22	Beladungseinfluss auf das NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis von KAT 288 . . . . .	70
4.23	Mittelwert des NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis über die Beladung an Katalysator 288 . . . . .	71
5.1	Systematik der Interpolationsrechnung: Ermittlung der Gewichtungsfaktoren . . . . .	72

---

5.2	Systematik der Interpolationsrechnung: Anwendung der Gewichtungsfaktoren . . . . .	73
5.3	Ablaufschema der Interpolationsrechnung . . . . .	74
5.4	Rollenmessung FTP-75 mit allen Kurztests . . . . .	75
5.5	PHEM Simulation FTP-75 mit allen Kurztests . . . . .	76
5.6	Interpolationsmethode . . . . .	76
6.1	Vergleich der Stickoxidemissionen von verschiedenen Kurztests . . . . .	78
6.2	Vergleich der Stickoxidemissionen von verschiedenen Kurztests . . . . .	79
6.3	Ablaufschema der Interpolation und Vergleichssimulation . . . . .	80
6.4	Schematische Darstellung der PHEM Rechnung . . . . .	81
6.5	Vergleich der Drehmomentenverläufe im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung . . . . .	82
6.6	Vergleich der Drehzahlverläufe im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung . . . . .	83
6.7	Drehmoment über Drehzahl Vergleich . . . . .	83
6.8	Vergleich der Temperaturen vor DOC im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung . . . . .	84
6.9	Vergleich der Stickoxidemissionen vor DOC im FTP-75 aus Simulation und Rollenmessung . . . . .	84
7.1	Überprüfungsschema der Simulation . . . . .	86
7.2	Simulierter und Gemessener Kurztest . . . . .	87
7.3	Zeitlicher Mittelwert des simulierten und gemessenen Kurztestes . . . . .	87
7.4	Kennfeldmessung . . . . .	88
7.5	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Stabilisierung eines Lastpunktes mit sinkendem NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis . . . . .	89
7.6	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Mittelwerte . . . . .	90
7.7	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Stabilisierung eines Lastpunktes mit steigendem NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis . . . . .	90
7.8	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Mittelwerte . . . . .	91
7.9	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> Stabilisierung von verschiedenen Lastpunkten . . . . .	92
7.10	Datenbasis FTP-75 und Kurztest . . . . .	93
7.11	NO <sub>x</sub> vor DOC, Stabilitätsanalyse . . . . .	94
8.1	NO <sub>x</sub> -Emissionen vor DOC . . . . .	95
8.2	NO <sub>x</sub> -Emissionen nach DPF . . . . .	96
8.3	NO <sub>x</sub> -Differenz . . . . .	96
8.4	ΔHC . . . . .	97
8.5	N <sub>2</sub> O nach dem DOC . . . . .	98
8.6	ΔN <sub>2</sub> O . . . . .	98
8.7	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis vor DOC . . . . .	99
8.8	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis nach DPF . . . . .	99

## Abbildungsverzeichnis

---

8.9	$\Delta\text{NO}_2/\text{NO}_x$ . . . . .	100
8.10	$\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis vor DOC Beladungsabhängig . . . . .	101
8.11	$\Delta\text{NO}_2/\text{NO}_x$ Beladungsabhängig . . . . .	101



# Tabellenverzeichnis

1.1	Dichte von Otto- und Diesekraftstoff . . . . .	7
3.1	Grundabmessungen und Grundmotordaten BMW M57TopUS . . . . .	30
3.2	Katalysatoren mit Zustand und deren Paarungen . . . . .	34
3.3	Gewichtung der Kurztestpunkte . . . . .	39
3.4	Kontrollpunkte für den Abgasgegendruck . . . . .	41
3.5	Messanweisung . . . . .	41
6.1	PHEM Eingangskennfeld . . . . .	82
7.1	Kennfeldpunkte für die Analyse der NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Stabilisierung . . . . .	91
10.1	Messübersicht . . . . .	115
10.2	Messübersicht . . . . .	116
10.3	Messübersicht . . . . .	117
10.4	Messübersicht . . . . .	118

# 10 Anhang

## 10.1 Projektgliederung

Diese Diplomarbeit bildet einen Teil eines Industrieprojekts. Um die Auswahl von Oxidationskatalysator und Partikelfilter Kombinationen besser und schneller treffen zu können ist eine Methodik für ein Messprogramm an einem stationären Motorprüfstand zu entwerfen. Mit dieser Methodik soll eine Vorauswahl von DOC/CSF Varianten für das Emissionsverhalten im FTP 75 getroffen werden.

Dieses Projekt wurde in drei Phasen gegliedert und beinhaltet folgende Punkte:

- Phase 1 (nicht Teil der Diplomarbeit)

Es soll ein Entwurf eines Kurztests erstellt werden. Dieser Kurztest soll durch einen gewichteten Mix der Ergebnisse einzelner Stationärphasen und gegebenenfalls auch von Lastsprüngen bezüglich der wichtigsten Parameter wie Temperatur und Massenstrom den FTP-75 Mittelwert erreichen. Die Verwendbarkeit des entworfenen Stationärtests soll durch eine Messung am PKW Rollenprüfstand und durch Berechnungen mit dem hauseigenen Simulationsprogramm PHEM überprüft werden. Die Rollenmessung umfasst den FTP-75 Zyklus und den Kurztest mit einer Größenordnung von 5 bis 10 Messpunkten unterschiedlicher Dauer. In weiterer Folge soll dieser Kurztest am Prüfstand gefahren werden.

- Phase 2

Am Motorprüfstand wird der Versuchsträger (M57TopUS) mit sämtlichen zu untersuchenden DOC/CSF-Varianten mit den in Phase 1 erarbeiteten Kurztest betrieben. Es muss eine Messroutine erarbeitet werden und die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung jederzeit gewährleistet werden.

DOC/CSF-Varianten aus Phase 1 sollen auch in Phase 2 getestet werden, um Unterschiede im Temperaturniveau des Abgasnachbehandlungssystems zwischen Rollenmessung und Motorprüfstand genau zu erfassen und eventuell korrigieren zu können. Die Güte des Messprogramms ist anhand von 10 DOC/CSF Varianten zu

überprüfen. Für diese Überprüfung sollen detaillierte Analysen der Abgasemissionen des Kurztestes durchgeführt werden.

- Phase 3

Anhand der gemessenen Abgasemissionsdaten sowie der zu definierenden Parameter soll für alle untersuchten Varianten eine Korrelation zwischen Prüfstandsmessung und Rollenmessung hergestellt werden.

Des Weiteren soll ein Vergleich von neuen und gealterten DOC/CSF Varianten und eine Aussage über deren Langzeitstabilität gemacht werden. Anschließend ist eine Untersuchung von  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2/\text{Ruß}$ -Verhältnis, HC und  $\text{N}_2\text{O}$  in Abhängigkeit der unterschiedlichen Abgasnachbehandlungssysteme durchzuführen. Anhand eines Interpolationswerkzeuges, dessen Erstellung nicht Teil der Diplomarbeit war, soll das Verhalten der jeweiligen DOC/CSF Variante im FTP 75 nachgebildet werden.

Zusammenfassend soll so anhand von Messungen am Motorprüfstand über den Kurztest und die Interpolation eine möglichst gute Voraussage über folgende Größen getroffen werden:

- $\text{NO}_2$  -Bildung
- Russeinfluss auf  $\text{NO}_2$ -Bildung
- $\text{N}_2\text{O}$ -Bildung
- HC-Konvertierung
- $\text{NO}_x$ -Einspeicherung

## 10.2 Messübersicht

Hier wird eine Übersicht über alle Messdaten gegeben. Dabei ist bei jedem Test die Startbedingung angegeben. Die Startbedingung setzt sich aus Beladungszustand (mSot, pExh), Temperatur vor dem DOC und Ladelufttemperatur zusammen. Des weiteren sind die Messpositionen der einzelnen Messgeräte und der Beladungszustand angegeben.

Beladung	Datum	Testn.	Bem.	Kat.Nr.	Messdatei	Datenstand
<i>REGENERATION DPF</i>						
260	~0%	9/5/2011	75	iO	260	P3i-000075.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
260	~0%	9/5/2011	76	iO	260	P3i-000076.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
260	~0%	9/5/2011	77	iO	260	P3i-000077.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Rückbau auf KatNr 280 / p40 1750-16mg ~25mbar neu eingestellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
280	~0%	9/5/2011	78	iO	280	P3i-000078.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
280	~0%	9/5/2011	79	iO	280	P3i-000079.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
280	~0%	9/5/2011	80	iO	280	P3i-000080.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>UMBAU auf KatNr 324 / p40 1750-16mg ~25mbar neu eingestellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
324	~0%	9/6/2011	86	iO	324	P3i-000086.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
324	~0%	9/6/2011	87	iO	324	P3i-000087.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
324	~0%	9/6/2011	88	iO	324	P3i-000088.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>UMBAU auf KatNr 302 / p40 1750-16mg ~25mbar Klappe nicht stellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
302	~0%	9/7/2011	89	iO	302	P3i-000089.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
302	~0%	9/7/2011	90	iO	302	P3i-000090.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
302	~0%	9/7/2011	91	iO	302	P3i-000091.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>UMBAU auf KatNr 298 / p40 1750-16mg ~25mbar Klappe nicht stellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
298	~0%	9/8/2011	94	iO	298	P3i-000094.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
298	~0%	9/8/2011	95	iO	298	P3i-000095.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
298	~0%	9/8/2011	96	iO	298	P3i-000096.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>UMBAU auf KatNr 323 / p40 1750-16mg ~25mbar Klappe nicht stellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
323	~0%	9/8/2011	97	iO	323	P3i-000097.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
323	~0%	9/8/2011	98	iO	323	P3i-000098.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
323	~0%	9/8/2011	99	iO	323	P3i-000099.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>UMBAU auf KatNr 288 - Beladungsuntersuchung / p40 1750-16mg ~25mbar neu eingestellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
288	~0%	9/9/2011	100	iO	288	P3i-000100.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~0%	9/9/2011	101	iO	288	P3i-000101.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~0%	9/9/2011	102	iO	288	P3i-000102.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
288	~30%	9/9/2011	103	iO	288	P3i-000103.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~30%	9/9/2011	104	iO	288	P3i-000104.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~30%	9/9/2011	105	iO	288	P3i-000105.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
288	~60%	9/12/2011	106	iO	288	P3i-000106.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~60%	9/12/2011	107	iO	288	P3i-000107.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~60%	9/12/2011	109	iO	288	P3i-000109.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~100%	9/12/2011	111	iO	288	P3i-000111.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~100%	9/12/2011	113	iO	288	P3i-000112.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
288	~100%	9/12/2011	114	iO	288	P3i-000113.me2 LP77T5GK152A`Mmax475

Tabelle 10.1: Messübersicht

Prüfprogramm	AVL	AMA	FTIR	Soot-Sensor	mSot in g	Delta p	Exh in hPa	Exh'tAdapTPFUS in °C	T21 in °C
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		1.22		11	185.3	29.1
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		1.62		13	185.3	28.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		2.1		12	185.3	29.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		0.26		8	185.3	28.4
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		0.51		9	185.3	29.1
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		0.7		10	185.1	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		0.73		11	185	28.6
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		0.98		11	185.3	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		1.22		11	184.9	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		0.37		10	185	28.8
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		0.57		10	184	28.7
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		0.9		10	185	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		1.5		12	185	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		1.81		13	185	28.8
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		2.06		14	185	29.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		0.52		9	185	30
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		0.8		10	185	29
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		1.1		11	185.2	29.2
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		1.59		12	185.3	26.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		1.9		12	185	27.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		2.07		12	185	29.2
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		9.19		17	185	29.1
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		9.48		17	185	29.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		10.22		18	185	29
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		19.37		21	185	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		19.49		22	185	28.2
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		19.67		22	185	28.4
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2		30.23		24	185	27.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3		26.83		27	185.6	29.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1		28.3		27	185.6	29.1

Tabelle 10.2: Messübersicht

Beladung	Datum	Testn.	Bem.	Kat.Nr.	Messdatei	Datenstand
<i>UMBAU auf KatNr 249 - Beladungsuntersuchung / p40 1750-16mg ~25mbar Klappe nicht verstellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
249	~0%	9/13/2011	119	iO	249	P3i-000119.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~0%	9/13/2011	120	iO	249	P3i-000120.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~0%	9/13/2011	121	iO	249	P3i-000121.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
249	~30%	9/13/2011	122	iO	249	P3i-000122.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~30%	9/13/2011	124	iO	249	P3i-000123.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~30%	9/13/2011	125	iO	249	P3i-000125.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
249	~60%	9/13/2011	126	iO	249	P3i-000126.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~60%	9/13/2011	127	iO	249	P3i-000127.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~60%	9/13/2011	128	iO	249	P3i-000128.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
249	~100%	9/13/2011	129	iO	249	P3i-000129.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~100%	9/13/2011	130	iO	249	P3i-000130.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
249	~100%	9/13/2011	131	iO	249	P3i-000131.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Rückbau auf KatNr 284 / p40 1750-16mg ~25mbar neu eingestellt</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
284	~0%	9/15/2011	137	iO	284	P3i-000137.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
284	~0%	9/15/2011	138	iO	284	P3i-000138.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
284	~0%	9/15/2011	136	iO	284	P3i-000136.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Umbau auf KatNr 289 / p40 1750-16mg ~25mbar neu eingestellt - erhebliche mech. Bearbeitung nötig</i>						
<i>REGENERATION DPF</i>						
289	~0%	9/19/2011	144	iO	289	P3i-000144.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~0%	9/19/2011	147	iO	289	P3i-000147.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~0%	9/19/2011	143	iO	289	P3i-000143.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
289	~30%	9/19/2011	149	iO	289	P3i-000149.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~30%	9/19/2011	150	iO	289	P3i-000150.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~30%	9/19/2011	151	iO	289	P3i-000151.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
289	~60%	9/20/2011	157	iO	289	P3i-000157.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~60%	9/20/2011	155	iO	289	P3i-000155.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~60%	9/20/2011	156	iO	289	P3i-000156.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
<i>Beladung DPF</i>						
289	~100%	9/20/2011	161	iO	289	P3i-000161.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~100%	9/20/2011	159	iO	289	P3i-000159.me2 LP77T5GK152A`Mmax475
289	~100%	9/20/2011	160	iO	289	P3i-000160.me2 LP77T5GK152A`Mmax475

Tabelle 10.3: Messübersicht

Prüfprogramm	AVL AMA FTIR Soot-Sensor mSot in g Delta p Exh in hPa Exh'tAdapTPFUS in °C T21 in °C						
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	1.65	13	185	28.7
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	1.9	14	184	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	2.34	14	185	28.7
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	8.66	18	185	28.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	11.13	19	185	28.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	10.98	19	185	28.4
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	18.4	22	185	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	18.62	22	185	29
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	19.58	24	185	29
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	28.47	28	185	29.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	26.9	26	185	28.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	28.5	25	185	28.4
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	2.1	13	185	29.1
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	2.28	13	185	29
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	1.94	13	185	28.8
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	3.93	15	185	28.6
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	4.97	16	185	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	4.12	16	185	29.4
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	9.46	20	185	28.7
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	9.76	20	185	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	10.33	19	185	28.3
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	19.3	21	185	28.1
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	18.98	22	185	27.9
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	19.6	22	185	28.6
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	1	3	2	31.99	26	185	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	2	1	3	26.3	25	185	28.5
Kurztest`M57TopUS`20110829`2	3	2	1	30	25	185	28.4

**Tabelle 10.4:** Messübersicht